

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja Maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas

**Droonifotode otsene georefereerimine Helmerti  
kolmemõõtmelise transformatsiooni abil**

Andris Pentjärv

Juhendajad: MSc Edgar Sepp

PhD Raivo Aunap

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2019

## **Droonifotode otsene georefereerimine Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil.**

Käesolevas töös uuritakse vertikaalsete droonifotode otsese georefereerimise täpsust Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil, objektiivi geomeetriliste moonutuste arvestamise mõju ja *Structure-from-Motion* (SfM) töövoost saadud parandatud kaamera nurkade ja asukohtade mõju otsese georefereerimise täpsusele.

Töö tulemusena selgus, et kasutades Helmerti kolmemõõtmelist transformatsiooni laiatarbe drooni piltide otseseks georefereerimiseks, on saadavad tulemused piisavalt täpsed ja kiirelt kättesaadavad, et kasutada kiireloomulistes töödes. Objektiivi geomeetriliste moonutuste arvestamine märkimisväärset efekti ei anna. SfM töövoost saadavad parandid muudavad tulemusi tunduvalt täpsemaks, kuid muudavad töötluse ajamahukaks.

CERCS:

P515 – Geodeesia

T111 – Pilditehnika

T181 – Kaugseire

Märksõnad: Droon, fotogramm-meetria, SfM, otsene georefereerimine.

## **Direct Georeferencing of UAV imagery using Helmert Three-Dimensional Transformation.**

The aim of the paper is to find out the accuracy of direct georeferencing of vertical UAV imagery using Helmert's three-dimensional transformation. The impact of using lens distortion correction methods and corrected camera positions and angles calculated by Structure-from-Motion algorithm were also analysed.

The results of the research concluded that using of the Helmert's three-dimensional transformation provides sufficient accuracy and the workflow speed to use in time-dependent operations. Use of lens distortion corrections had little impact to the results, contrary to corrected camera positions and angles that improved the results, but would make acquiring the results more time-consuming.

CERCS:

P515 – Geodesy

T111 – Imaging, image processing

T181 – Remote sensing

Keywords: UAV, photogrammetry, SfM, Direct Georeferencing

# Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus .....	5
Töös kasutatud lühendite seletus .....	7
1. Teooria .....	8
1.1. Riistvara.....	8
1.1.1. UAV .....	8
1.1.2. GNSS seade.....	11
1.1.3. Gimbal ja IMU .....	12
1.1.4. Kaamera .....	13
1.2. Kontseptsioonid .....	14
1.2.1. Georefereerimine.....	14
1.2.2. Fotogramm-meetria ja SfM .....	16
1.2.3. Objektiivi geomeetrilised moonutused.....	19
1.2.4. Arvutus: otsene georefereerimine Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil .....	20
1.3. Varasem uuritus .....	21
2. Metoodika.....	22
2.1. Töövoog.....	22
2.1.1. Katse 1 .....	23
2.1.2. Katse 2.....	23
2.1.3. Katse 3.....	23
2.2. Riistvara.....	26
2.2.1. Droon DJI Mavic 2 Pro .....	26
2.2.2. Kaamera kalibreerimine .....	26
2.3. Töövoog.....	29
2.3.1. Pythoni skripti kirjeldus .....	29
2.3.2. Andmete struktuur.....	30
2.4. Välitöö .....	32
2.4.1. Katseala konfiguratsioon.....	32
3. Tulemused .....	35
3.1. Katse 1 .....	35

3.2.	Katse 2 .....	36
3.3.	Katse 3 .....	38
3.3.1.	Parandatud kaamera asukohad .....	38
3.3.2.	Parandatud kaameranurgad .....	40
3.3.3.	Parandatud kaamera asukohad ja nurgad .....	41
4.	Arutelu.....	45
	Kokkuvõte .....	48
	Summary .....	49
	Kasutatud allikad.....	50
	Lisad.....	53
	Lisa 1 .....	53
	Töös kasutatud skript .....	53
	Lisa 2 .....	56
	Pildid välitöö protsessist.....	56

## Sissejuhatus

Mehitamata õhusõidukid ehk droonid (ka UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*) on viimaste aastate jooksul kogunud hulgaliselt populaarsust nii kodu- kui kommertskasutajate hulgas. Tänu tehnoloogia arengule on muutunud kättesaadavaks nii lennuvahendid kui neil kasutatavad erinevad sensorid (kaamerad jms), ning sellest tulenevalt on droonide kasutusvaldkond väga lai, ulatudes hobifotograafiast lahingutoetuseni.

Droonidel enimkasutatav sensor on kaamera, mis on enamasti kaugjuhitav drooni enda juhtseadmelt, ning millega on võimalik teha fotosid nii vertikaalis (suunaga maapinna poole), kui erinevate nurkade all. Fotode kasutamiseks on enamikul juhtudel vajalik järeltöötlus, mille käigus omistatakse piltidele kas maapinnakoordinaadid (georefereerimine), eemaldatakse moonutused, töödeldakse värvigammat või muud sarnast. Maapinnakoordinaatide kiireks hankimiseks on vajalik otsene georefereerimine, mille abil on võimalik kasutada droonitehnoloogiat asukoha kindlaks tegemisel, praktilises kasutuses siis kiiret reageerimist nõudvateks ülesanneteks, näiteks päästetööd, tulekahjude avastamine, lahinguluure vms.

Georefereerimine on andmete sidumine maapinna koordinaatidega. Georefereerimise puhul eristatakse kahte tehnoloogiat – otsene ja kaudne georefereerimine (joonis 1). Kaudse georefereerimise puhul kasutatakse maapinnal eelnevalt mõõdistatud punkte, mis seatakse vastavusse pildil olevate punktidega, mitme pildi georefereerimisel võetakse kasutusele piltide ühised punktid. (Cramer jt 2000).

Otsene georefereerimine, mis ilmus kommertskasutusse 1990ndate keskpaigas, on piltidele maapinnakoordinaatide omistamine, kasutades lennuvahendil olevaid mõõteseadmeid, nagu GNSS (globaalne asukohamääramise süsteem, *Global Navigation Satellite System*), IMU (inertsiaalse liikumise andur, *Inertial Measurement Unit*) ja magnetomeeter. Nimetatud seadmete abil tehakse kindlaks lennuvahendi orientatsioon ja asukoht maapinna suhtes, mille tulemusel on võimalik projitseerida või ümber arvutada terve pildi või sellel asetsevate punktide asukoht maapinnal. Sellest tulenevalt ei ole otsese georefereerimise puhul vajalik eraldi täiendavate maapinnapunktide mõõdistamine. Otsese georefereerimise meetodi väljatöötamiseni viiski vajadus suuremahuliste objektide kaardistamiseks, mille puhul maapealne mõõdistamine oleks olnud ebaotstarbekalt töömahukas (Cramer jt 2000; Mian jt 2015).

Käesoleva töö ajendiks on vajadus droonipiltidelt saadava ruumiinfo kiireks kasutamiseks, samuti töömahu vähendamine väiksemat ruumilist täpsust nõudvate tööde puhul. Teatud olukordades võib olla tarvilik reaalaja lähedane töötlemiskiirus ja arvutuste vähene keerukus ning sellest tulenevalt keskendub käesolev töö ainult vertikaalsetele droonifotodele.

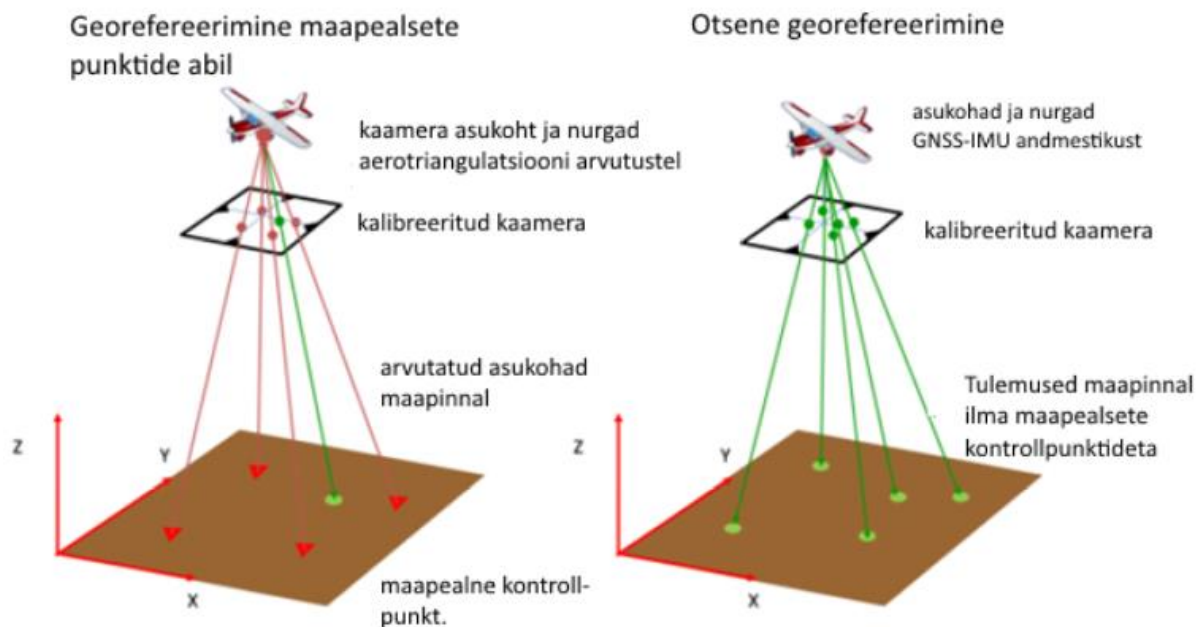
Käesoleva töö eesmärgiks on luua võimalikult lihtne lahendus vertikaalsuunas pildistatud droonifotode otseseks georefereerimiseks kasutades droonil olevate sensorite andmeid, ning selgitada välja meetodi täpsus võrrelduna GNSS-seadmega maapinnal mõõdistatud punktidega. Lisaks selgitada välja, millisel määral mõjutavad tulemusi kaamera objektiivi geomeetriliste moonutuste arvestamine ja parandatud kaamera kaldenurkade ja asukohtade arvestamine.

Käesoleva töö uurimisküsimused on:

Milline on laiatarbe UAV piltide otsese georefereerimise täpsus?

Millised on objektiivi geomeetriliste moonutuste arvestamise mõjud ruumilisele täpsusele laiatarbe UAV kasutamisel?

Millisel määral mõjutab tulemusi parandatud kaamera nurkade ja asukohtade parandamine?



Joonis 1. Aerotriangulatsiooni ja otsese georefereerimise võrdlus (Mian jt 2015).

## Töös kasutatud lühendite seletus

IMU – inertliikumise andur, *Inertial Measurement Unit*

GNSS – Globaalne asukohamääramise (satelliit)süsteem *Global Navigation Satellite System*

SfM – *Structure from Motion*

DEM – Digitaalne kõrgusmudel, *Digital Elevation Model*

UAV – Mehitamata õhusõiduk, *Unmanned Aerial Vehicle*

RTK – Reaalajas kinemaatiline (mõõdistus), *Real Time Kinematic*

VRS – Virtuaalne baasjaam, *Virtual Reference Station*

LiDAR – Laserskänner, *Light Detection And Ranging*

# 1. Teooria

## 1.1. Riistvara

### 1.1.1. UAV

Mehitamata õhsõidukid edaspidi – UAV (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*), on lennumasinad, mis suudavad lennata autonoomselt, kaugjuhtimisega või kasutades mõlemat meetodit ning võivad kanda erinevaid sensoreid, relvastust, signaaliedastajaid aga ka muid seadmeid ja kaupa. Esialgsed droonid on arenenud militaarkasutuses olnud autonoomsetest sihtmärkidest Teise maailmasõja järel. (Guilmartin) Esinevad ka lühendid RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), ROA (*Remotely Operated Aircraft*), RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), UVS (*Unmanned Vehicle Systems*), UAS (*Unmanned Aerial Systems*) kuid antud töös kasutatakse selguse huvides peamiselt väljendeid UAV ja droon (Eisenbeiss, Sauerbier 2011).

UAV definitsioon hõlmab endas: kinnitatud tiivaga droonid, multirootorid, õhust kergemad droonid (õhupallid, lohed), surmava jõuga lennumasinad, lendsihtmärgid, alternatiivjuhtimisega lennumasinad või piloodita lahinglennumasinad. Mõningate määratluste järgi loetakse UAVdeks ka tiibrakette (Eisenbeiss, Sauerbier 2011).

Praegusel ajal on tsiviilkäibes enim levinud droonitüüpideks kinnitatud tiivaga n.ö lennuk-tüüpi ja multirootor-tüüpi droonid, vähem levinud on üherootorilised, helikopter-tüüpi droonid.

Kinnitatud tiivaga droonide puuduseks on sageli asjaolu, et nendega ei ole võimalik koguda andmeid õhus paigal seistes ja sageli vajab seade startimiseks ka spetsiaalset lisaseadet või tuleb ta õhku käsitsi visata. Lisaks on võrdlemisi ohtlik sellise seadme maandumine eriti tingimustes, kui puudub pehme tasane pinnas, ning on oht aparaadi või mõõteseadmete vigastamiseks (Eisenbeiss, Sauerbier 2011). Kinnitatud tiivaga droon suudab aga väiksema energiakuluga mõõdistada suurema maa-ala, kui multirootor-tüüpi droon.

Multirootor-droonid on tehniliselt keerukamad ja sellest tulenevalt ka altimad erinevatele tehnilistele probleemidele. Lisaks on tööpõhimõtte eripärast tulenevalt mitmerootorilised UAV-d tunduvalt energiakulukamad ja sellest tulenevalt väiksema lennuajaga. Positiivse poole pealt on multirootor UAV-d paindlikumad, kuna suudavad õhku tõusta koha pealt ja ka seista vajadusel õhus paigal (Eisenbeiss 2009).



Antud töös on kasutatud multirootor-tüüpi drooni, ning edaspidises töös keskendutakse eelkõige neile.

UAV platvormid leiavad tänapäeval tänu oma mobiilsusele ja kasutusmugavusele laialdast kasutust lisaks militaarvaldkonnale ka põllumajanduses, logistikas, arheoloogias, filminduses, korrakaitstes ja päästevaldkonnas.

Droonide kasutus ja müük erakätesse on käesoleva kümendi keskpaigast alates plahvatuslikult kasvanud, olles kasvanud arvuliselt vahemikus 2014 kuni 2018 kolmelt miljonilt droonilt kolmeteistkümnes miljoni müüdud droonini aastas. Aastaks 2021 kasvab droonide müük ülemaailmselt hinnanguliselt 29 miljoni ühikuni aastas (Valentak 2017).

Kuna UAVd ja nende paigaldatavad sensorid (antud töö kontekstis fotoaparaadid) on tänapäeval saavutanud üsna väikesed mõõtmed, on nendega lihtne ja odav viia läbi suurte alade kaardistamist õhust. See on vajalik eelkõige alade puhul, mille maapealne kaardistamine oleks aeganõudev või tülikas, kuid mis on piisavalt väikesed, et lennuki või helikopteri kasutamine ei oleks majanduslikult otstarbekas. UAVde kasutamine mõõdistustel on õigustatud ka juhul, kui piirkond on ligipääsmatu või ohtlik, et viia läbi maapealseid mõõdistusi, ning mõõdistus ei eelda sentimeetri täpsusega tulemusi.

Kaardistustöödel kasutatavad multirootor-tüüpi droonid koosnevad põhiliselt järgnevatest komponentidest (joonis 2):

#### **1. Mootorid**

Harilikult neli, kuus või kaheksa mootorit.

#### **2. Aku**

#### **3. GNSS seade**

Praegusel ajal mitut satelliidisüsteemi (GPS, GLONASS) ja RTK võimekust omavad GNSS seadmed võimaldavad drooni asukoha määrata väga täpselt.

#### **4. IMU**

Assisteerib GNSS seadet asukoha määramisel, sageli koostöös magnetkompassiga. Väljundiks on meie töö kontekstis tähtsad orientatsioon ja nurgad.

#### **5. Sensor**

Peamiselt fotoaparaat, multispektraalne kaamera või LiDAR.

#### **6. Gimbal**

Sensori stabiilse asendi säilitamiseks.

## 7. Kommunikatsiooniseadmed

Harilikult on UAV varustatud mitme erineva kommunikatsiooniantenniga, üks drooni enda juhtimiseks, teine andmete ülekandeks. Olenevalt kasutatavast tehnoloogiast võib antenne ja sagedusi kasutusel olla rohkem.

## 8. Juhtimisseadmed

Mootorite tööd, lennuvahendi asukohta jne kontrolliv(ad) moodul(id). Tagavad UAV lennu stabiilsuse ja automaatse lennu tingimustes täidavad ka autopiloodi rolli. Sageli on kasutusel Raspberry Pi ja Arduino baasil juhtimisseadmed.

## 9. Ühendav raam

Kannab kõiki eelmainitud komponente

## 10. Arvuti

Sensori ja telemeetria andmete vastuvõtuks (ka reaajas)

## 11. Juhtimispuhl

UAV käsijuhtimiseks.

(Burdziakowski 2017)



Joonis 2. Tüüpilise kaardistustöödel kasutatava drooni komponendid (Burdziakowski 2017).

#### *1.1.1.1. Piirangud UAV kasutamisel*

Kuna droonid on oskamatul kasutusel potentsiaalsed ohuallikad muudele õhusõidukitele, on nende kasutamisel Eesti Vabariigis ja ka rahvusvaheliselt hulk piiranguid, millest tuleb seadme kasutamisel ja töötamisel lähtuda.

Eesti Vabariigis on õhuruum jagatud kaheks: kontrollitud ja kontrollimata õhuruum. Kontrollimata õhuruumis võib drooni kasutada igaüks kuni lennukõrguseni 150 meetrit.

Kontrollitud õhuruum asub lennujuhtide kontrolli all, ning seal on Lennuameti loal lubatud lennata kuni 150 meetri kõrgusel, tingimusel et Lennuametile on esitatud taotlus tegevuse läbiviimiseks. Kontrollitud õhuruumid jäävad üldiselt lennujaamade ümbrusse.

Lennukeelualadel on igasugune droonidega töötamine ilma lennuameti, kaitsejõudude või keskkonnaministeeriumiga kooskõlastamata keelatud.

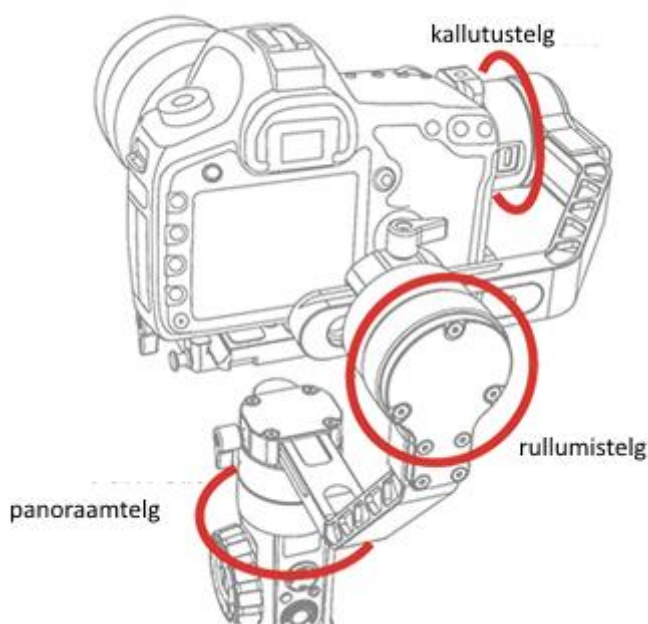
Kindlasti tuleb suuremate rahvakogunemiste aladel töötades kooskõlastada oma tegevus ürituse koordinaatoriga ning arvestada inimeste ohutusega (Lennuamet jt 2018).

#### **1.1.2. GNSS seade**

UAV-de GNSS seadmed on nende tähtsaimaks navigatsiooniseadmeks, tagades koos IMUga drooni täpse asukoha määramise. Väiksematel ja lihtsamatel droonidel on kasutusel enamasti ühesageduslikud GNSS vastuvõtjad, mis sageli toetavad vaid ühte positsioneerimissüsteemi (enamasti GPS). Keerukamate droonide puhul on kasutusel mitmesageduslikud vastuvõtjad, tihti ka RTK (*Real Time Kinematic*) lahendused, mis kasutavad VRS (*Virtual Reference Station*) teenust või on üles seatud eraldi baasjaam. Kasutades lihtsaid madala hinnaga GNSS ja IMU seadmeid, on võimalik drooni asukoht määrata ligikaudu meetri täpsusega. Kasutades RTK-lahendusi ja IMU samaaegselt, on võimalik tuvastada drooni asukoht sentimeetrite täpsusega (Gerke, Przybilla 2016). GNSS-seadme ja IMU puhul on vajalik neilt edastatud andmete täpne ajaline sünkroniseerimine fotokaamera fotodega, mis on võimalik drooni pardal oleva arvuti abil või järeltöötlusena. Kuigi droonil oleva GNSS seadme täpsus võib kõikuda vastavalt atmosfäärioludele, varjestusele ja/või satelliitide konstellatsioonile (Penttjärvi 2016), siis antud töös neid faktoreid arvesse ei võeta, kuna eeldatav täpsuse kõikumine muudest faktoritest tulenevalt on suurem kui võimalikud GNSS seadme mõõdistuste hälbed.

### 1.1.3. Gimbal ja IMU

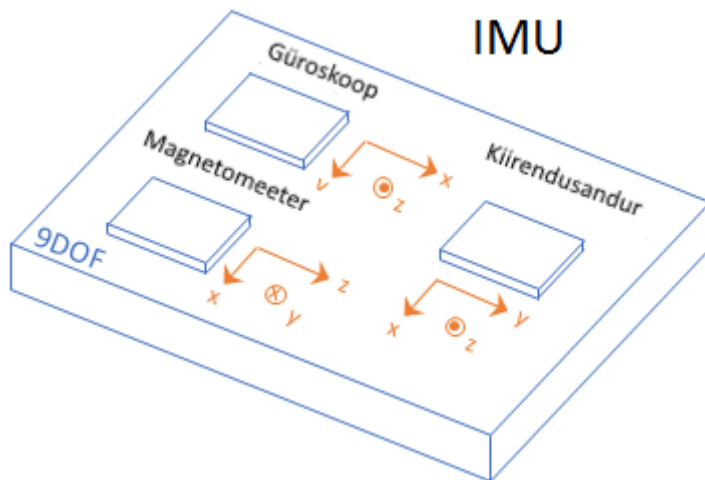
Kaamera ja drooni vaheliseks lüliks on üldjuhul stabilisaator ehk gimbal, mis säilitab kaamera orientatsiooni drooni orientatsiooni muutuse korral (joonis 3). Gimbal koosneb harilikult kolmest mootorist, mis mõjutavad kaamera liikumist kolme telje suhtes, ning arvutist. Viimane reageerib gimbalis oleva sisemise IMU (güroskoobi) signaalidele ja korrigeerib kaamera asendi vastavalt tagasisidele. (Tiimus, Tamre 2010). Gimballi andmete logi on ka oluliseks teabeallikaks andmete järeltöötlusel. Gimballi rolli on raske ülehinnata, kuna drooni nurk maapinna suhtes on lennu ajal pidevas muutumises ning seetõttu vajab kaamera kompensatsioonimehhanismi, et juhuslikust faktorist tingitud drooni asendi muutus ei põhjustaks puudujääke andmestikus.



Joonis 3. Kolme teljega gimbal. Punase ringiga on märgitud mootorite asukohad (Evogimbals 2017).

IMU ehk inertliikumise andur koosneb güroskoopidest, kiirendusmõõturitest ja magnetomeetrist, mille abil on võimalik jälgida ja mõõta seadme pöörd- ja suundliikumisi (joonis 4). Eelmainitud liikumiste mõõtmiseks on IMU varustatud kolme telje suhtes liikumisi jälgivate sensoritega. Sensorite andmed töödeldakse spetsiaalse orientatsiooni arvutava programmiga, mis edastab erinevate sensorite andmed ja tulemuse ühe infovoona (lengerdus/*yaw*, tangaaž/*pitch*, rullumine/*roll*). Enamik IMUsid kasutab oma arvutustes

Kalmani filtri baasil algoritme (Magdwick et al., 2011). IMU on samuti täiendavaks abivahendiks GNSS seadmele asukoha määramisel.



Joonis 4. IMU ja selle komponendid (MathWorks)

#### 1.1.4. Kaamera

Kaamera on käesoleva töö kontekstis kõige olulisem UAV sensor.

Kaamera sisemise orienteerimise parameetrid on ideaaltingimustes lennu ajal muutumatud, et vältida piltidel geomeetria muutusi. Sellest tulenevalt on parim kaamera fotogramm-meetrilisteks töödeks kaamera, mille optika oleks võimalikult stabiilne (fikseeritud fookuskaugusega objektiiv) ja väheste liikuvate osadega. Väljundi hea kvaliteedi tagamiseks on vajalik ka RAW formaadi võimalus ning vahetatavad objektiivid (Therry 2018).

Täiskaaderkaamerad (kaamerad, mille kaadri mõõtmed on võrdsed 35 mm filmi kaadriga), nagu Canon 6D või Nikon D750, annavad parima väljundi väikseima arvu fotodega, ning seetõttu on võimaluse korral täiskaader kaamerate kasutamine parim variant. Ka sobivaimad objektiivid fotogramm-meetriliste tööde jaoks hõlmavad eelkõige objektiive, mille geomeetrilised moonutused on minimaalsed ning suurendusfunktsioon puudub või ei ole kasutusel (Therry 2018).

Optika geomeetriliste moonutuste tasandamiseks on kasutusel spetsiaalne tarkvara, mille abil tuleb kaamera enne või pärast lendu kalibreerida. Antud töös on selleks kasutusel programmi Agisoft Metashape (SfM töövoogu võimaldav programm) eraldiseisev komponent Lens, mis suudab talle ette antud spetsiaalsest ruudustikust tehtud piltide abil tuletada kaamera

parameetrid, mida saab hiljem kasutada Agisoft Metashapes või muus kasutusel olevas tarkvaras või koodis.

## **1.2. Kontseptsioonid**

### **1.2.1. Georefereerimine**

Aeropiltide otseseks georefereerimiseks on vajalikud kaamera sisemise ja fotode välimise orienteerimise parameetreid. Sisemise orienteerimise parameetrid, on foto peapunkti koordinaadid, kaamera fookuskaugus ja sensori suurus. Objektiivi geomeetrilised moonutused saab kindlaks teha laboratoorsetes tingimustes ja erinevate tarkvarapakettide abil aerofotosid kasutades, kui on olemas mõõdistatud maapinnapunktid. Üldjuhul on eelmainitud parameetrid ühe mõõdistuse ajal samad, kuid kui kaamera konfiguratsioon muutub, tuleb seda ka edasistel arvutustel arvesse võtta (Škaloud 1999).

Fotode välise orienteerimise parameetrid on see-eest lennu kestel pidevas muutumises, mis tähendab, et neid tuleb salvestada reaajas, tagamaks otsese georefereerimise võimalus. Põhimõtteliselt on võimalik kasutada igasugust piisava täpsusega asukohta ja kõrgusinfot edastavat süsteemi, kui on täidetud järgnevad tingimused (Škaloud 1999):

- Fotoaparaadi positsioon ja orientatsioon IMU ja GNSS-seadme suhtes on tuvastatav piisava täpsusega.
- et eelnevad näitajad on konstantsed või nende muutumine on modelleeritav
- sensorite salvestatavad andmed on võimalik piisava täpsusega viia samale ajalisele skaalale.

Seejuures „piisav täpsus“ on määratud sellega, milline on teostatavate tööde soovitatav kvaliteet (Škaloud 1999).

Kaamera orienteerimise parameetrid hõlmavad endas kaamera ehituslikest iseärasustest sõltuvate omaduste kogumit (sisemise orienteerimise parameetrid) ja kaamera füüsilist orienteeritust ruumis määravat välimiste orienteerimise parameetrite kogumit (välise orienteerimise parameetrid).

#### 1.2.1.1. Sisemise orienteerimise parameetrid

Sisemise orienteerimise parameetrid määravad ära pildi koordinaatsüsteemi ja kaamera koordinaatide vahelise seose. Sisemise orienteerimise parameetreid väljendatakse kolmnurkmaatriksina  $\mathbf{K}$  (joonis 5), kus peadiagonaalil asuvad elemendid  $f_x$  ja  $f_y$  (fookuskaugus jagatud piksli laiusega),  $u_x$  ja  $u_y$ , mis tähistavad peapunkti (optilise peatelje lõikumiskoht foto tasapinnaga, näidatakse foto keskpunkti suhtes) ning  $s$  (*skew* – kaldenurk) (Pollefeys jt 1999). Kui kaamera sisemise orienteerimise parameetrid ei ole teada, kasutatakse praktikas määramatuste vähendamiseks kaamera kalibreerimist.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_x \\ & f_y & u_y \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

Joonis 5. Kaamera sisemise orienteerimise parameetrid maatriksina (Pollefeys jt 1999).

#### 1.2.1.2. Välimise orienteerimise parameetrid

Välimise orienteerimise parameetrid (määravad ära kaamera asukoha ja vaatesuuna ehk orientatsiooni) koosnevad kuuest osast, mis kirjeldavad kaamera koordinaatsüsteemi ruumilist asendit ja suunda globaalse koordinaatsüsteemi suhtes.

Välise orienteerimisparameetrite pöördmaatriksi arvutamiseks on tarvilik teada pikitelje, ristiteje ning pöördliikumise nurka (lengerdus, tangaaž, rullumine) ning perspektiivitsentri koordinaate  $X_0$ ,  $Y_0$  ja  $Z_0$ .

Pildi koordinaatsüsteemi ruumiline asend on määratud sisemise orienteerimise parameetritega, ning perspektiivitsentri asukoht maapinna suhtes vektoriga  $X_0$  (joonis 6), ning ortogonaalne pöördmaatriks  $R$  (joonised 7, 8) defineerib orientatsiooninurgad ruumis (Luhmann jt 2013).

Välimise orienteerimise parameetreid väljendatakse ruutmaatriksina  $\mathbf{R}$ .

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

Joonis 6. Perspektiivitsentri positsioon (Luhmann jt 2013).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Joonis 7. Pöördmaatriks (Luhmann jt 2013).

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$

Joonis 8. Pöördmaatriksi väärtuste arvutamine (Luhmann jt 2013).

### 1.2.2. Fotogramm-meetria ja SfM

#### 1.2.2.1. Raalnägemine

Raalnägemine (*Computer Vision*) on teadusdistsipliin, mille eesmärgiks on arendada matemaatilisi tehnikaid piltide baasil objektide kuju ja välimuse taasloomiseks, esemetuvastuseks, klassifitseerimiseks jne. Piltlikult öeldes üritab raalnägemine teha arvuti abil sama, mida inimsilm ja aju koostöös teevad. Praegusel ajal on olemas tehnikad, mille abil on võimalik luua tõetruu mudel keskkonnast, kui on saadaval piisaval hulgal ülekattega pilte.

Valdkonnad, kus raalnägemine rakendust leiab, on näiteks:

- Fotogramm-meetria ja 3D modelleerimine
- Isejuhtimissüsteemid sõidukitele
- Isikutuvastus
- Liikumise tuvastamine
- Filmindus
- Valvesüsteemid

Raalnägemine kasutab oma toimimisel peamiselt teadmisi ja leiutisi füüsikast (optika, läätsed, sensorid), ning valguse murdumisest ja liikumisest ning viimaks projitseerimisest tasapinnale. Need teadmised on kasutusel eesmärgiga taastada piltidelt objektide omadusi (mis on juskui vastupidine fotograafiale ehk objektide pildistamisele) (Szeliski 2010). Objektid, mis tehnika abil ära tuntakse, on harilikult klassifitseeritud inimesele arusaadavatel alustel, näiteks



lennukitüüpide tuvastamine aerofotodelt või isejuhtiva auto sensorisüsteemi poolt tuvastatav kõndiv inimene (Mundy, Hartley 1993).

Üks paljudest raalnägemise valdkondadest on objektide modelleerimine. See hõlmab otseselt ka sõidukitel vajalikku objektide tuvastamist, kuid antud juhul tuvastatakse objekti visuaalsed omadused täielikult. Antud rakendus leiab kasutust nii meelelahutus- kui militaarvaldkonnas, näiteks maapinna 3D mudelite koostamisel. raalnägemise arendamisel on võetud eesmärgiks inimese poolse sisendi võimalikult vähene kaasamine, mis vähendab nii ajakulu kui võimalike vigade tekke võimalusi (Mundy, Hartley 1993).

Raalnägemise ajalugu ulatub 1970ndatesse aastatesse, mil mitmete robotika ja tehisintellektiga tegelevate ülikoolide juures loodeti, et visuaalse sisendi loomine on lihtne töö ja avab võimalused tunduvalt keerukamate probleemide lahendamiseks.

Peamiseks erinevuseks digitaalse pilditöötlusega oli raalnägemise arendamisel soov taasluua objekti kolmemõõtmeline struktuur, olles seega vaheetapiks täieliku keskkonna tajumisel (Szeliski 2010). Siiski on raalnägemise arendamisel selgunud, et inimese nägemis- ja tajumissüsteemile sarnast tööriista on tunduvalt keerukam välja töötada.

Antud töö kontekstis on raalnägemise tähtsus seotud eelkõige asjaoluga, et mitmed SfM (*Structure from Motion*, kirjeldatakse täpsemalt töö järgnevas osades) rakendused kasutavad oma toimimises just algoritme raalnägemise valdkonnast, mis on seotud piltide omavahelise sidumisega. Üks enimkasutatavatest tehnikatest on David Lowe poolt välja töötatud SIFT (*Scale-invariant feature transform*) algoritm. SIFT kasutab oma tööprotsessis punktide leidmist neid ümbritsevate pikslite analüüsi abil, millele järgneb võtmepunktide leidmine teistel pildidel ja nende ühendamine (Sinha).

#### 1.2.2.2. Fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria areng algas praktiliselt koos fotograafia enda leiutamisega, ning selle esialgsed rakendused olid samuti seotud militaarvaldkonnaga. Tänapäeval on fotogramm-meetria rakendused levinud ka kommertsvaldkonnas, ning saadaval on hulgaliselt nii vaba- kui kommertstarkvara, mille abil ka lihtsamate kaameratega on võimalik arvestatavaid tulemusi saada. Fotogramm-meetriaga seotud distsipliinidest väärneb märkimist veel kaugseire, mis hõlmab mitmeid sarnaseid tehnikaid, kuid erinevalt fotogramm-meetriast keskendub kaugseire rohkem pildi radiomeetrilistele omadustele, kui fotogramm-meetria keskendub pigem pildi geomeetrilistele omadustele (Mundy, Hartley 1993).

Fotogramm-meetria leiab peamiselt rakendust kaardistamisel ja lähi-fotogramm-meetrias.

Kaardistamisel on olulisem rakendus topograafiliste kaartide tootmine. Vajalikud pildid toodetakse aero- või satelliitpildistamise käigus, ning pildid seotakse maapealse koordinaatsüsteemiga referentspunktide abil, mis on eelnevalt maapinnal välja mõõdistatud. Kaardistamise puhul tuleb arvestada ka ebatäpsustega, mis tulenevad vigadest maapealsete kontrollpunktide positsioneerimisel, kaamera mudeli ebatäpsustest ning arvutusvigadest, kuid nende mõju on võimalik modelleerimise käigus erinevate kaalude lisamisel tasandada (Mundy, Hartley 1993).

Lähi-fotogramm-meetria puhul kasutatakse analüüsis pilte, mis on tehtud uuritavatest objektidest lähedasel distant sil, ning peamiselt kasutatakse seda tehnikat kolmemõõtmeliste mudelite loomisel pildiseeriast. Peamised erinevused kaardistamisega tulenevad asjaolust, et tsentraalprojektsiooni mudel ei pruugi olla piisava täpsusega või vastata tegelikele pildistamistingimustele. Kuna erinevad rakendused eeldavad erinevat ruumilist resolutsiooni, on ka arvutuskäigud sageli erinevad, ning kasutada ei pruugi saada üks-ühele samu valemuid igas olukorras. Lähi-fotogramm-meetria leiab tüüpiliselt rakendust arhitektuuris, antropomeetrias, tööstuslikus metrooloogias ja arheoloogias (Mundy, Hartley 1993).

Raalnägemise ja fotogramm-meetria ühisteks nimetajateks on vajadus kaamera kalibreerimiseks, kaamera asendi kindlaks tegemine, mudeli projekteerimine ja mudeli konstrueerimine.

Seoses arvutite võimsuse kasvuga on kasvanud kodukasutajatele saada olevate raalnägemise kui ka fotogramm-meetriliste tarkvarapakettide arv, nii kommerts- kui vabavara näol. Tuntuimateks kommertstarkvaradeks on Agisoft Photoscan (kasutusel ka antud töös), Autodesk ReCap (pilveteenusel põhinev), Pix4D, vabavarast on levinud VisualSfM, micmac, AliceVision. Tarkvarateek OpenCV, mis hõlmab endas suurel hulgal erineva funktsionaalsusega mooduleid robotikast näotuvastuseni, omab muuhulgas sarnast võimekust eelpoolnimetatud programmidega, kuid selle kasutamine nõuab mõningaid teadmisi programmeerimisest ja erinevate pakettide kasutamisest.

#### *1.2.2.3. Structure from Motion*

*Structure from motion* (lühendina SfM) on töövoog, mis töötab sarnaselt stereofotogramm-meetria, mis tähendab, et objekti kolmemõõtmeline struktuur saadakse mitmete ülekatet omavate piltide töötlemisel. Siiski on põhimõtteline erinevus asjaolus, et SfM mudeli loomisel

ei ole piltidel vajalik eelnevalt luua ja piltidele märkida koordinaatidega võrgustikku, vaid kaamera asukohad, orientatsioonid ja ümbruskonna geometria arvutatakse nn. „kiirekimpude sobitamise“ (*bundle adjustment*) käigus. Kuna SfM töövoos ei pea kasutama maapinna koordinaate, on selliselt saadud mudel ilma mõõtkavata ja orientatsioon on juhuslik. Mudeli georefereerimiseks kasutatakse sageli töötlemise käigus maapealseid kontrollpunkte. (Snavely 2008).

SfM töövoos peamised etapid (Snavely 2008; Westoby jt 2012):

1. Piltidelt võtmepunktide leidmine – võtmepunktid leitakse igal pildil, ning need katuvad üle kõikide piltide nii, et konkreetse võtmepunkti asukoht igal pildil on teada. See tähendab, et programm peab olema võimeline tuvastama sama objekti erinevate nurkade alt. See on ka vahetu kokkupuutekoht SfM ja raalnägemise vahel – raalnägemisest pärinevad algoritmid on selle SfM protsessi toimimise aluseks.
2. Kolmemõõtmelise ruumi rekonstrueerimine – programm ennustab eelnevalt loodud võtmepunktide baasil kaamera asukohad ning loob hõreda punktipilve, millest saab tuleva kolmemõõtmelise mudeli selgroog. Eelnevalt loodud kaamera asukohti arvesse võttes luuakse pildihulgad, mille baasil hakatakse looma tihendatud punktipilve. Tihendatud punktipilv luuakse üldjuhul stereofotogramm-meetria sarnase tööpõhimõtte abil, kuna nüüd on teada kaamerate asukohad.
3. Järeeltöötlus ja digitaalse kõrgusmudeli (DEM) loomine – mudeli teisendamiseks maapealsesse koordinaatsüsteemi kasutatakse harilikult maapealseid kontrollpunkte, mille abil arvutatakse välja mudeli mõõtkava ja orientatsioon. Samuti loovad paljud tarkvarad ka digitaalse kõrgusmudeli, mida on võimalik eksportida erinevatesse GIS tarkvaradesse. Kuna DEM on harilikult lihtsustatud ja väiksema failimahuga, on seda GIS tarkvaral lihtsam kasutada kui suuremahulist 3D mudelit.

### **1.2.3. Objektiivi geomeetrilised moonutused**

Objektiivi geomeetriliste moonutuste arvestamiseks ja kõrvaldamiseks on kasutusel Duane C. Browni (Brown 1971, 1966) arvutustel baseeruv mudel, tuntud ka kui Brown-Conrady mudel (joonis 9), mis on kasutusel ka Agisoft Metashape ja Agisoft Lens tarkvarades. Mudeli sisendparameetriteks on punkti koordinaadid kaamera koordinaatsüsteemis (antud joonisel X, Y, Z), fookuskaugus ( $f$ ), peapunkti nihe pildi keskpunkti suhtes ( $C_x$ ,  $C_y$ ), radiaalse ja tangentsiaalse moonutuse koefitsiendid ( $K$ ,  $P$ ), afiinsus ja mitteortogonaalsus ( $B_1$ ,  $B_2$ ) ja pildi

kõrgus ja laius pikslites ( $w$ ,  $h$ ). Optika geomeetriliste moonutuste kõrvaldamine on eelkõige oluline suurte geomeetriliste moonutustega objektiivide puhul, kuid antud projektis viiakse läbi eesmärgiga selgitada välja selle mõju otsese georefereerimise täpsusele.

$$x = X / Z$$

$$y = Y / Z$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$$

$$y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$$

$$u = w * 0.5 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2$$

$$v = h * 0.5 + c_y + y'f$$

Joonis 9. Brown-Conrady mudeli rakendamine (Agisoft LCC, 2017).

#### 1.2.4. Arvutus: otsene georefereerimine Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil

Asukoha arvutamiseks kasutati Helmerti kolmemõõtmelist transformatsiooni (joonis 10), mis eeldab seitset parameetrit: kolm translatsiooni  $x$ ,  $y$  ja  $z$  suhtes, kolm pöördnurka ( $\phi$ ,  $\kappa$ ,  $\omega$ ) ja mõõtkava  $m$ . Nimetatutest kuus parameetrit, translatsiooniparameetrid ja pöördnurgad, vastavad välise orienteerimise parameetritele. Parameetrid rakendatakse järjekorras pööratavast-vaheta (Luhmann jt 2013).  $X_0$ ,  $Y_0$  ja  $Z_0$  tähistavad perspektiivtsentri koordinaate, millele reaalmaailma koordinaatide saamiseks liidetakse mõõtkava, kaameranurkade pöördmaatriksi ja pildil oleva punkti ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) koordinaatide korrutis.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Joonis 10. Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni rakendamine. (Luhmann jt 2013)

Käesolevas töös tehtud arvutuste sisend- ja väljundandmed on L-EST97 koordinaatsüsteemis, arvutuse käigus koordinaate teistesse süsteemidesse ei teisendata. Objektiivide geomeetriliste moonutuste tasandamine teostatakse antud töös enne Helmerti transformatsiooni teostamist.

### 1.3. Varasem uuritus

Aastal 1999 avaldas tšehh Jan Škaloud oma doktoritöö, kus uuris IMU ja DGPS lahenduste kasutust aeropiltide georefereerimise hõlbustamiseks. (Škaloud 1999)

Otsese georefereerimise uurimisega on varasemalt tegelenud näiteks ka Michael Cramer ja Norbert Haala, kes oma aastal 2000 ilmunud artiklis „*Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric applications*“ hindasid sellel ajal saada olnud IMU/GNSS seadme Applanix POS/DG 310 omadusi otsese georefereerimise teostamiseks lennukitel (Cramer jt 2000).

O. Mian uuris oma 2015. aastal avaldatud artiklis Applanix APX-15 UAV ja Sony a7R kaamera komplekti kasutamist teostamaks georefereerimist ilma maapealsete punktideta ning kasutades GNSS andmestiku järeltöötlust. Kasutusel oli Microdrones md4-1000 drooniplatvorm (Mian jt 2015).

Eelnevaga sarnasel moel on aastal 2015 uurinud otsese georefereerimise kasutamist ka Petr Gabrlik, kes uuris selle rakendamist DSM loomisel, kasutades võimalikult kättesaadavaid seadmeid (Gabrlik 2015).

## 2. Metoodika

### 2.1. Töövoog

Käesoleva töö käigus loodi ja Agisoft Photoscani ja raamatu „*Close range photogrammetry and 3D imaging*“ (Luhmann jt 2013) valemitel põhinev Pythoni skript, mis arvutab pildil määratud punkti ümber Eesti põhikaardi süsteemi koordinaatideks. Pildil on punkt määratud pildikoordinaatidega rea ja veeru numbreid kasutades. Pildil määratud punktideks võivad olla suvalised pildil leiduvad objektid. Käesolevas töös on huvi pakkuvateks punktideks maapeal GNSS seadmega mõõdistatud punktid (tähistatud markervärviga). Punktide L-EST97 süsteemis koordinaadid on kasutusel täpsuse kontrolliks. Maa peal mõõdistati kokku 89 punkti. Töös on kasutatud 65 fotot ja kokku on nendel fotodel 2065 maapealse punkti kujutist.

Skripti (vt lisa 1) sisendiks on kaks faili - fail kaamera parameetritega (sensori mõõdud millimeetrites ja pikslites, fookuskaugus, optilise peapunkti asukoht, objektiivi geomeetrilise moonutuse parameetrid) ja fail pildil määratud punktide andmetega (punkti asukoht pildil piksliühikutes, pildi asukoht ja kaldenurgad). Viimasele on lisatud veerud antud punkti GNSS seadmega mõõdetud asukohtadega L-EST97 koordinaatsüsteemis, et lihtsustada hilisemat arvutatud asukohtade ja tegelike asukohtade erinevuste võrdlust ehk otsese georefereerimise täpsust. Koordinaatide erinevuste põhjal arvutatud keskmisi vigu ja standardhälbeid kasutatakse ka erinevate katsete omavahelise paremuse hindamiseks.

Skript võimaldab arvutustesse kaasata optikast põhjustatud geomeetrilise moonutuse korrigeerimise. Selle jaoks vajalike parameetrite leidmiseks kasutatakse kaamera kalibreerimist. Käesolevas töös on geomeetriliste moonutuste kirjeldamiseks ja eemaldamiseks kasutusel Brown-Conrady mudel (Brown 1971, 1966).

Kalibreerimise läbiviimiseks on erinevaid võimalusi. Näiteks spetsiaalse mustri pildistamine, mille järel vastav programm kalibreerimisparameetrid välja arvutab. Võimaluseks on ka suure hulge maapealsete kindelpunktide kasutamine, mille järel leitakse kalibreerimisparameetrid SfM töövoos abil. Antud protsessi kirjeldatakse täpsemalt peatükis 3.1.2.

Nii sisend- kui väljundandmed on antud skriptis .csv formaadis.

Läbi viidi kolm erinevat katset.

### **2.1.1. Katse 1**

Katses 1 selgitatakse välja, milline on laiatarbe UAV piltide otsese georefereerimise täpsus.

Selle teostamiseks võetakse droonipildid ja nende metaandmetest eraldatakse  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  väärtused (kaamera asukoht), ja kolm kaldenurka (tangaaž  $\varphi$ , lengerdus  $\kappa$  ja rullumine  $\omega$ ). Seejärel tehakse kindlaks pildipunkti koordinaadid pildi koordinaatsüsteemis, mille järel arvutatakse Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni (joonis 10) abil välja pildipunkti koordinaadid L-EST 97 koordinaatsüsteemis. Välja arvutatud L-EST 97 koordinaate võrreldakse tegelike GNSS seadmega mõõdistatud koordinaatidega ja koordinaatide erinevuste põhjal arvutatakse ruutkeskmine viga.

### **2.1.2. Katse 2**

Katses 2 selgitatakse välja kuidas mõjub objektiivi geomeetriliste moonutuste korrigeerimine otsese georefereerimise täpsusele.

Selle välja selgitamiseks kasutati kahel erineval moel saadud kaamera kalibreerimise parameetreid (laboratoorselt Agisoft Lensi abil, lisaks Agisoft Metashape abil saadud täiendavad parameetrid katsealal GNSS seadmega mõõdistatud punktide ja aerofotode kasutamisel). Kaamera geomeetrilise moonutuse parameetreid väljendatakse Brown-Conrady mudeli (joonis 9) abil. Vastavaid valemeid kasutades saab piltidelt geomeetrilise moonutuse kõrvaldada, mida antud katses tehti. Seejärel sisestati parandatud pildipunkti koordinaadid analoogselt katses 1 kasutatud Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni valemisse, mille abil arvutatakse need ümber L-EST97 koordinaatsüsteemi. Seejärel võrreldakse tulemusi eelnevalt GNSS seadmega mõõdistatud koordinaatidega ja leitakse vead analoogselt katsele 1.

### **2.1.3. Katse 3**

Katses 3 võeti kasutusele Agisoft Metashape poolt loodud SfM mudel, millest võeti parandatud kaamera asukohad ja kaldenurgad, misjärel uuriti nende mõju otsese georefereerimise tulemustele. Maapealsed punktid on mõõdistatud GNSS seadmega, mis annab punktidele täpsuse suurusjärgus 1-2 cm (TopCon 2014). Droonipiltide asukohtade hälve on tunduvalt suurem, kuna antud töös kasutusel oleval droonil on ühesageduslik GPS/GLONASS võimekusega GNSS antenn (DJI). SfM mudeli loomisel piltide asukohti ja kaldenurki täpsustatakse fotogramm-meetriliste meetodite abil (kiirtekimpude sobitamine).

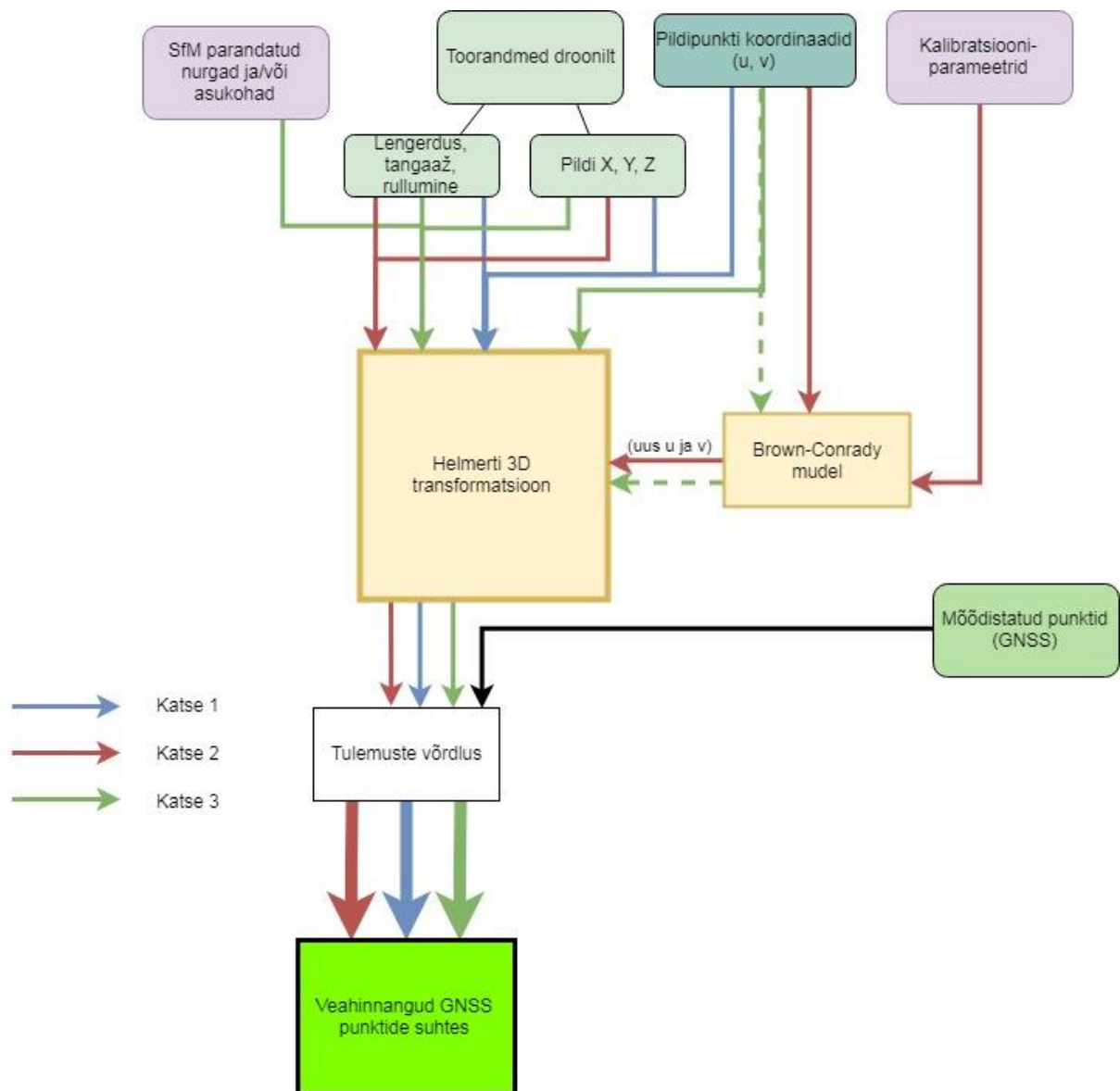
SfM mudeli poolt parandatud nurgad ja asukohad on iteratiivse optimeerimisülesande lahendamise tulemus, kus lahendatavaks ülesandeks on kiirtekimpude sobitamine. Seega peaks

parandatud asukohad ja nurgad olema sellised, mis annavad kogu fotobloki mõttes kõige väiksema vea kolmemõõtmelise mudeli kokkupanekul.

Parandatud kaamera asukohtade ja kaldenurkade mõju hindamiseks sisestati antud parameetrid samuti Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni valemisse, mille tulemusel sooviti teada saada, kuidas SfM abil parandatud kaamera asukohtade ja nurkade kasutuselevõtt mõjutab tulemusi.

Läbi arvutati kõik erinevad kombinatsioonid.

Katsete läbiviimise põhimõtet selgitavad joonis 11 ja tabel 1.



Joonis 11. Katsete läbiviimise skeem.



Tabel 1. Katsete läbiviimisel kasutatud erinevad kombinatsioonid (testid) ja kodeering. Lühendid esitatakse kujul: (katse nr)\_(geomeetriline korrigeerimine)\_(asukoha ja/või nurkade korrigeerimine), näiteks: K3\_L\_AN tähistab katset nr 3, mille käigus kasutatakse laboratoorse kalibreerimise parameetreid ja rakendatakse SfM mudelist asukoha ja nurkade korrigeerimist.

Testi kood	Piltide geomeetriline korrigeerimine	Pildi asukoht (XYZ)	Pildi kaldenurgad ( $\phi$ , $\kappa$ , $\omega$ )
K1_0_0	Ei toimu	Toorandmed (pildi metaandmed)	Toorandmed (pildi metaandmed)
K2_L_0	Laboratoorse kalibreerimise parameetrid	Toorandmed	Toorandmed
K2_V_0	Välitöö põhjal saadud kalibreerimisparameetrid	Toorandmed	Toorandmed
K3_0_A	Ei toimu	Parandatud kaamera asukohad SfM mudelist	Toorandmed
K3_L_A	Laboratoorse kalibreerimise parameetrid	SfM mudelist	Toorandmed
K3_V_A	Välitöö põhjal saadud kalibreerimisparameetrid	SfM mudelist	Toorandmed
K3_0_N	Ei toimu	Toorandmed	Parandatud kaameranurgad SfM mudelist
K3_L_N	Laboratoorse kalibreerimise parameetrid	Toorandmed	SfM mudelist
K3_V_N	Välitöö põhjal saadud kalibreerimisparameetrid	Toorandmed	SfM mudelist
K3_0_AN	Ei toimu	SfM mudelist	SfM mudelist
K3_L_AN	Laboratoorse kalibreerimise parameetrid	SfM mudelist	SfM mudelist
K3_V_AN	Välitöö põhjal saadud kalibreerimisparameetrid	SfM mudelist	SfM mudelist

Eksperimendi läbiviimisel kasutati töövahenditena tarkvarasid Agisoft Lens, Agisoft Metashape, Microsoft Excel (arvutuste kontroll, analüüs), Tableau Desktop (analüüs), Draw.io (joonis). Kasutatavaks kaameraks oli DJI Mavic 2 Pro peal olev originaalkaamera. Kontrolliks kasutatavate maapinnapunktide mõõdistamiseks oli kasutusel Tartu Ülikooli geoloogia osakonna kasutatav geodeetiline GNSS seade TopCon Hiper V.

## 2.2. Riistvara

### 2.2.1. Droon DJI Mavic 2 Pro

Eksperimendi käigus oli kasutusel droon DJI Mavic 2 Pro originaalkaameraga. Antud drooni otsustati kasutada lähtuvalt asjaoludest, et tegu on nii kodu- kui kommertskasutajale lihtsalt kättesaadava drooniga, mille tehnilised parameetrid on heal tasemel.

#### DJI Mavic 2 Pro tehnilised parameetrid (DJI)

Kaamera	Droon
Sensor: 1" CMOS, 20megapikslit	Lennukaal: 907g
ISO vahemik: 100-6400 (video), 10-12800 (foto)	Maksimaalne lennuaeg: 31 minutit
Katiku kiirus: 8-1/8000 s	GNSS: GPS+GLONASS
Foto resolutsioon: 5472x3648	

Drooni lennu planeerimisel oli kasutusel tarkvara Pix4D Capture (töötab Android nutiseadmes).

### 2.2.2. Kaamera kalibreerimine

Kaamera laboratoorne kalibreerimine viidi läbi 24.01.2019, aadressil Vanemuise 46, ruumis 335. Kasutusel olnud abivahenditeks olid projektor, nurgik ja laserlood statiiviga. Projektori abil kuvati seinale ruudustik (joonis 12), mille lõi Agisoft Lens (Agisofti eraldiseisev tarkvara kaamera kalibreerimiseks).

Ruudustiku geomeetria kontrolliks kasutati nurgikut (ruutude külgede pikkus) ja laserloodi (täisnurkade kontroll), ning seejärel tehti 35 fotot. Fotode töötlemiseks sisestati valik nendest Agisoft Lensi, mis arvutas välja kaamera objektiivi geomeetrilise moonutuse parameetrid. Valiku tegemisel võeti arvesse muuhulgas ruudustiku katvust pildil (et ei esineks n.ö. ära lõigatud nurki), fotoaparaadi kaldenurka ruudustiku suhtes (tagamaks erineva nurga all tehtud piltide esindatuse).

Moonutusparameetrid, mille Agisoft Lens väljastab (Agisoft LCC 2017)(Joonis 13):

$F_x$  – horisontaalne fookuskaugus pikslites

$F_y$  – vertikaalne fookuskaugus pikslites

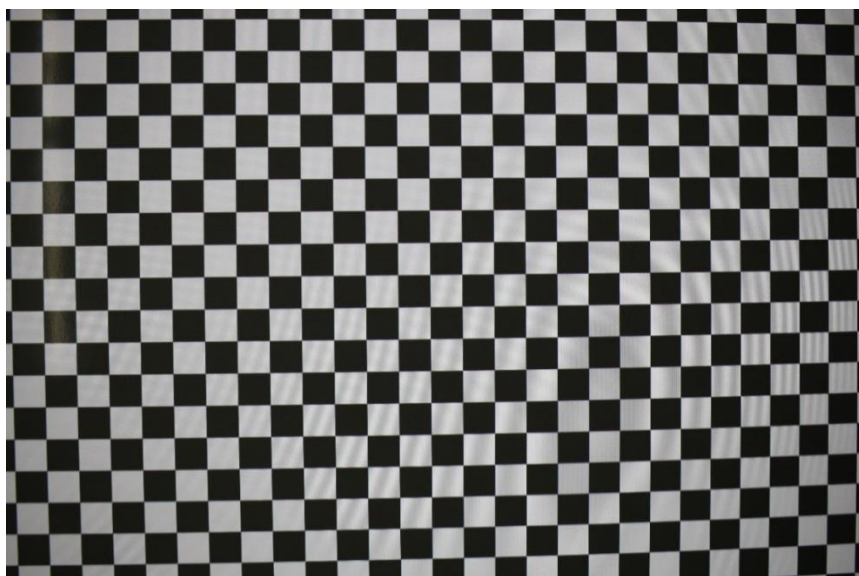
$C_x$  – peapunkti x-koordinaat

$C_y$  – peapunkti y-koordinaat

$K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$  – radiaalne läätse moonutus Browni mudeli järgi.

$B_1$  ja  $B_2$  – afiinsus ja kaldenurk (*skew*)

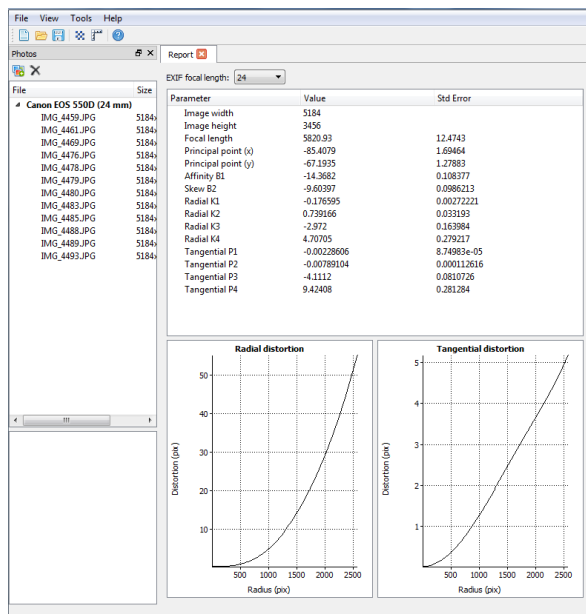
Raportis kajastuvad veel kalibreerimise parameetrid ja nende vead, lisaks radiaalse ja tangentsiaalse moonutuse graafikud. Agisoft Lens võimaldab ka kalibratsiooniparameetrid otse eksportida teistele tarkvaradele sobivatesse formaatidesse.



Joonis 12. Näide kalibreerimiseks kasutatud fotost.

Paralleelselt kalibreeriti kaamera ka tarkvaras Agisoft Metashape. Nimetatud rakendus võtab sisendandmeteks drooniga tehtud pildid, mille järel teostatakse punktipilve ja SfM mudeli loomine. SfM mudeli loomise järel märgitakse piltidel ära punktid, mis on juba eelnevalt mõõdistatud GNSS seadmega. Punktide asukoha täpsemale paikaasetamisele manuaalselt järgneb mudeli optimeerimine, mille käigus arvutatakse välja ka kaamera täpsemad orienteerimisparameetrid. Tegemist on tavapärase praktikaga kaamera kalibreerimisel (Luhmann jt 2016), sest erinevalt tasapinnalise lähedasel distantil oleva ruudustiku pildistamisest saame kalibreerimise läbi viia kõrguselt, millel (mille lähedaselt) hakkavad toimuma hilisemad seirelennud.

Võrreldes Agisoft Lensi väljundiga on Agisoft Metashape väljastatavad tulemused mõnevõrra lihtsustatud, kuid käesoleva töö jaoks vajalik andmestik on kättesaadav ka sealt (joonis 14).



Joonis 13. Kuvatõmmis Agisoft Lensi kalibreerimise tulemustega.

The screenshot shows the Agisoft Metashape Camera Calibration dialog box. The dialog is for a camera labeled "L1D-20c (10.26mm)" with 79 images, 5472x3648 resolution. The camera type is set to "Frame". The pixel size (mm) is 0.00241071 x 0.00241071. The focal length (mm) is 10.26. The dialog includes checkboxes for "Enable rolling shutter compensation" and "Film camera with fiducial marks". The "Initial" tab is selected, showing the following parameters:

Parameter	Value
f:	4358.18899
cx:	-8.58978
cy:	10.248
k1:	0.00859625
k2:	-0.0191427
k3:	0.0859958
k4:	-0.103593
b1:	-18.7104
b2:	1.04543
p1:	0.000647141
p2:	-0.00201175
p3:	0
p4:	0

The "Adjusted" tab is also visible, showing the same parameters. The "Bands" and "GPS/INS Offset" tabs are also present. At the bottom, there is a table with the following columns: Camera label, Resolution, Camera model, Focal length, and Date & time.

Camera label	Resolution	Camera model	Focal length	Date & time
DJI_0430.JPG	5472x3648	L1D-20c	10.26	2019:03:25 11:57:48
DJI_0428.JPG	5472x3648	L1D-20c	10.26	2019:03:25 11:57:42
DJI_0426.JPG	5472x3648	L1D-20c	10.26	2019:03:25 11:57:36
DJI_0424.JPG	5472x3648	L1D-20c	10.26	2019:03:25 11:57:30
DJI_0422.JPG	5472x3648	L1D-20c	10.26	2019:03:25 11:57:24

At the bottom of the dialog, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Joonis 14. Agisoft Metashape väljastatavad parameetrid.

## 2.3. Töövoog

DJI Mavic 2 Pro kirjutab -, analoogselt kõigile kaasaegsetele digitaalkaameratele, vajaliku informatsiooni (käesoleval juhul pildi asukoht, kaldenurgad, objektiivi fookuskaugus, sensori mõõdud, pildistamise kellaaeg jne) pildi metaandmetesse. Pildi metaandmed on kirjutatud pildi päisesse või on pildiga kaasas väliselt (IPTC 2019).

Droonilennu kohta salvestatakse lisaks ka lennulogi, mille formaat olenevalt kasutusel olevast tarkvarast võib erineda. Käesolevas töös kasutati lennuplaani koostamiseks ja lendude läbiviimiseks tarkvara Pix4D Capture, mis salvestab lennulogisse lennutrajektoori, piltide tegemise asukohad ja muud telemeetria andmed.

Metaandmetest töödeldavate tabelandmete saamiseks kasutati Pythoni koodi, mis eraldas .jpg failist metaandmed ja väljastas need .xlsx formaadis tabelina. Andmete hulgast eemaldati ebavajalikud veerud vältimaks segadust edasisel andmetöötlusel.

Andmed, mis metaandmetest töös kasutamist leidsid:

Gimbali parameetrid (lengerdus, tangaaž, rullumine), pildifaili nimetus ja kaamera asukohakoordinaadid.

Koodi sisendiks on kaamera välise orienteerimise parameetrid tabelina (sh. drooni asukoht), punkti koordinaadid pildil, punkti tegelikud koordinaadid (mõõdetuna geodeetilise GNSS seadmega), samuti kaamera kalibreerimise parameetrid ja pildipunkti koordinaadid. Antud parameetrite põhjal arvutatakse välja punkti tegelikud koordinaadid ning erinevus geodeetilise GNSS seadmega mõõdetud tulemustest. Seejärel väljastas kood tulemused tabelina.

Töövoog kontrollimiseks loodi paralleelselt ka Microsoft Exceli tabel, milles kajastati kõiki koodis esinevaid arvutusi, ning kontrolliti nende õigsust. Pythoni koodi kasutati keskkonnas Jupyter Notebook, tagades võimaluse koodi lihtsaks ja mugavaks töötlemiseks.

### 2.3.1. Pythoni skripti kirjeldus

Loodud Pythoni skripti (lisa 1) tööjärjekord on järgmine:

1. Vajalike pakettide import
2. Kaamera parameetrite import, vajalike kaamera parameetrite defineerimine koodis
3. Sisendandmete import, muutujate defineerimine ja väljastamine
4. Pöördmaatriksi arvutamine

5. Pildi koordinaatide arvutamine rea ja veeru numbritest (alguspunkt pildi keskel, moonutusi arvesse ei võeta) või optika geomeetriliste moonutuste tasandamine (Brown-Conrady võrrand).
6. Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni läbiviimine eelnevalt sisestatud parameetrite põhjal.
7. Tulemuste väljastamine .csv formaadis failina.

### 2.3.2. Andmete struktuur

Skript kasutab sisendina ja väljundina .csv (*comma separated value*) vormingus tekstifaile.

Sisendandmeteks on kaamera parameetrid ning droonilennu ja GNSS mõõdistuse käigus saadud andmed (joonis 15).

Kaamera parameetrite fail koosneb 20 veerust.

*nimi* – fotoaparaadi nimi ja kalibreerimise kuupäev

*sdim\_x\_mm, sdim\_y\_mm* – sensori mõõtmised millimeetrites

*sdim\_x\_px, sdim\_y\_px* – sensori mõõtmised pikslites

*f\_mm* – fookuskaugus millimeetrites

*fx, fy* – horisontaalne ja vertikaalne fookuskaugus

*cx, cy* – pildi keskpunkti koordinaadid piksliühikutes

*skew, k1, k2, k3, k4, p1, p2, p3, p4, b1* – geomeetriliste moonutuste parameetrid

Droonilennu ja GNSS mõõdistuse käigus kogutud andmed sisestati .csv formaadis faili, mis koosnes 15 veerust. Andmed viidi vastavale kujule Microsoft Exceli abil. Sisendandmete veerupeatkirjade seletused:

*Punkt* – punkti identifitseerimistunnus Agisoft Metashapes (genereeritud automaatselt)

*Nr* – punkti identifitseerimistunnus välitöö jaoks

*Camera* – pildi identifitseerimistunnus Agisoft Metashapes

*Img* – pildifaili nimi

*X\_est, Y\_est, Z\_est* – kaamera asukoha koordinaadid

*Yaw\_est, Pitch\_est, Roll\_est* – pildi kaldenurgad

*u, v* – punkti asukoht pildil piksliühikutes

*X\_true, Y\_true, Z\_true* – punkti tegelik asukoht mõõdetuna GNSS seadmega.

punkt	nr	camera	img	X_est	Y_est	Z_est	Yaw_est	Pitch_est	Roll_est	u	v	X_true	Y_true	Z_true
0	100	181	DJI_0271.J	657328.8	6472835	147.9	143.3	-90	0	3862.92	667.529	657322.6	6472810	68.83
0	100	182	DJI_0277.J	657352.2	6472844	147.6	-35	-89.9	0	450.157	2584.7	657322.6	6472810	68.83
0	100	183	DJI_0278.J	657342.8	6472859	147.6	-35.4	-90	0	487.851	3559.8	657322.6	6472810	68.83
0	100	209	DJI_0341.J	657325	6472832	168.4	52	-89.9	0	3575.26	2356.6	657322.6	6472810	68.83
0	100	210	DJI_0342.J	657339.1	6472841	168.4	53	-89.9	0	3576.58	3079.67	657322.6	6472810	68.83
0	100	223	DJI_0360.J	657322.9	6472862	167.8	-124.1	-90	0	728.982	659.958	657322.6	6472810	68.83
0	100	224	DJI_0361.J	657309.2	6472852	167.6	-124.1	-90	0	787.594	1394.86	657322.6	6472810	68.83
0	100	241	DJI_0404.J	657406.8	6472919	137.8	-128.6	-47	0	1532.87	170.657	657322.6	6472810	68.83
0	100	242	DJI_0406.J	657409.9	6472895	137.3	-99.8	-47.9	0	42.35	697.149	657322.6	6472810	68.83

Joonis 15. Näide sisendandmetest. (Kuvatõmmis Microsoft Excelist).

Väljundandmete puhul kirjutab skript juurde üheksa veergu andmeid (joonis 16).

$x_{24}$ ,  $y_{24}$ ,  $z_{24}$  – punkti koordinaadid maapinnal arvutatuna skripti poolt.

$x_{img}$ ,  $y_{img}$  – kaugus pildi keskpunktist pikslites x ja y teljel (pildikoordinaadid).

$d_{x24}$ ,  $d_{y24}$ ,  $d_{z24}$  – arvutatud koordinaatide erinevus GNSS seadmega mõõdetud koordinaatidest. Number 24 tähistab raamatust „*Close range Photogrammetry and 3D Imaging*“ (Luhmann jt 2013) valemit 2.40.

$rms_{24}$  – ruutkeskmine viga.

$x_{24}$	$y_{24}$	$z_{24}$	$x_{img}$	$y_{img}$	$d_{x24}$	$d_{y24}$	$d_{z24}$	$rms_{24}$
657342.6	6472920	67.4119	-2.05484	-0.11629	-0.10018	-0.057	0.021903	0.117322
657295.9	6472898	68.1411	-2.33328	0.691037	-0.16465	0.056586	0.031098	0.176856
657335.4	6472930	67.41	-2.18753	-0.81333	0.095797	-0.16042	0	0.186844
657356.6	6472920	67.27	-2.15842	-0.0664	-0.03515	-0.21954	0	0.222336
657304.3	6472885	68.12342	-2.20177	-0.41046	0.097898	-0.24028	-0.02658	0.260815
657370.3	6472927	67.17961	-2.38375	0.122364	0.299995	-0.20736	-0.02039	0.365256
657350.4	6472911	67.49	-1.85154	0.612012	-0.25647	0.262813	0	0.367213
657303.8	6472886	68.18422	-2.3088	1.115214	-0.39085	-0.14147	0.034224	0.417075
657342.4	6472920	67.39	-1.34313	-0.49766	-0.37743	0.185441	0	0.420527
657367	6472864	68.07043	-2.33539	-0.54982	-0.23205	-0.38212	-0.02957	0.448036
657316.3	6472895	67.89	-2.03122	-0.22405	0.455649	-0.03486	0	0.456981
657352.5	6472886	67.74	-6.34176	-3.43505	0.184115	-0.44751	0	0.483909

Joonis 16. Näide väljundandmetest (kuvatõmmis Microsoft Excelist). Pildilt puuduvad veerud, mis on identsed sisendandmetega.

## 2.4. Vältöö

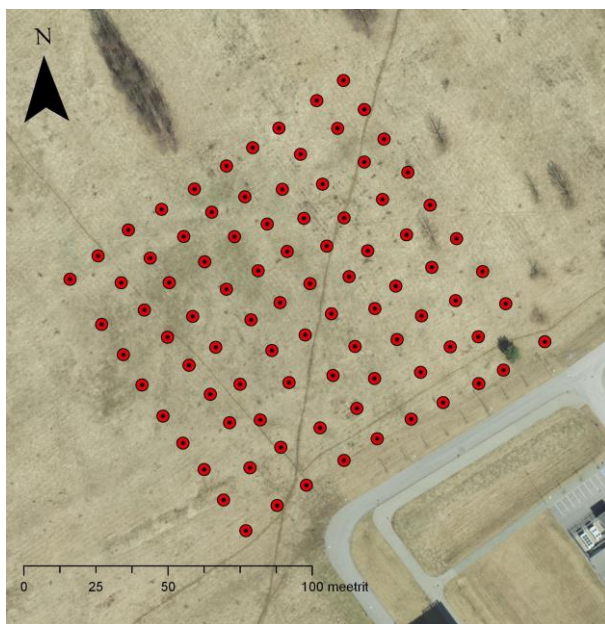
Vältöö viidi läbi 25.03.2019 Tartu Ülikooli keemiahoone läheduses asuval platsil, mis kohandati katseplatsiks. Antud piirkond valiti katsealaks põhjusel, et ta asub sobivas asukohas, on suhteliselt avatud (vahetus läheduses puudub oluline kõrghaljastus) ja selle läheduses Tartu Ülikooli füüsikahoone katusel asub ilmajaam ilmastikuolude fikseerimiseks.

### 2.4.1. Katseala konfiguratsioon

Katsealaks on ligikaudu 120x120m mõõtmetega ala, kuhu märgiti markervärviga punktid (joonis 17), mille asukohad mõõdistati GNSS seadmega Topcon Hiper V. Kokku märgiti maha 90 punkti (joonis 18, lisa 2).



Joonis 17. Näide maha märgitud punktist.



Joonis 18. Punktide konfiguratsioon maastikul.



Punktide märkimiseks kasutati sinist ja punast markervärvi. Punktid märgiti maha šablooni abil, seejuures nurga- ja loodepoolsed otspunktid märgistati erimärgistusega (vastavalt siis nurgapunktid kastiga punktitähise ümber, otspunktid joonega välimise külje suunas), et vältida mõõdistusel punktide loendamisel ette tulla võivaid vigu.

Punktide mahamärkimisele ja mõõdistamisele järgnes lend drooniga DJI Mavic 2 Pro, millega teostati kalibreerimislennud kahel eri kõrgusel. Esimene lend teostati 80 meetri kõrgusel maapinnast kirde-edela suunaliselt, millele järgnes lend 100 meetri kõrgusel lend kagu-loode suunaliselt. Mõlema lennu puhul oli kaamera seatud vertikaalselt maapinna suhtes. Ilmastikutingimused lendude ajal püsisid muutumatuna (tabel 2)(Tartu Ülikool 2019):

Tabel 2. Ilmastikutingimused välitöö ajal.

Temperatuur	5.4 kraadi
Õhuniiskus	67.5%
Õhurõhk	1003.9 hPa
Tuul	W 7.7 m/s, esines tugevamaid puhanguid
Sademed	0.0 mm
Kiirgusvoog	320 W/m <sup>2</sup>

Kalibreerimislennu puhul pildistati algul 176 pilti (nii kald- kui vertikaalsuunalised), millest hilisema töötuse lihtsustamiseks eemaldati pildid, mis ei katnud katsepiirkonda piisavalt (pildile jäi liiga vähe maapeal mõõdetud kontrollpunkte), ning selle tulemusel jäi edasiseks töötuseks alles 65 pilti, millest 22 oli tehtud 80 meetri kõrguselt ja 43 oli tehtud 100 meetri kõrguselt. Alles jäid ainult vertikaalpildid, kuna kaldpiltide töötus oleks nõudnud täiendavate parameetrite lisamist valemites, mida esialgu veaohu vähendamiseks teha ei soovitud.

Tarkvaras Agisoft Photoscan viidi maapealsed punktid kokku pildil asuvate asukohtadega, võttes arvesse, et kõik punktid oleksid vähemalt mõnel pildil esindatud ning igal pildil asuks vähemalt 5 käsitsi paika seatud punkti. Ülejäänud punktide asukohad ennustab Agisoft Metashape automaatselt ning käsitsi paika seatud punktide järgi arvutab see kaamera kalibratsiooniparameetrid antud projekti jaoks.

Kaamera kalibratsiooniparameetrid laboratoorsetes tingimustes (n.ö. malelauapildilt pildistades) ja välitöö tulemusel on kajastatud tabelis 3.

Tabel 3. Kalibreerimise tulemused laboratoorsetes tingimustes ja välitöö käigus.

Parameeter	Laboratoorsed tingimused	Välitöö
Sensori laius (mm)	13.2	13.2
Sensori kõrgus (mm)	8.8	8.8
Sensori laius (px)	5472	5472
Sensori kõrgus	3648	3648
Fookuskaugus (mm)	10.26	10.26
$F_x$	3876.18	4358.189
$F_y$	3870.819	4358.19
$C_x$	2561.977	2727.41
$C_y$	1758.869	1852.248
$Skew$	-6.936909252	1.04543
$K_1$	-0.004738765	0.00859625
$K_2$	0.07229234	-0.0191427
$K_3$	-0.153682313	0.0859958
$K_4$	0.102471127	-0.103593
$P_1$	-0.00515948	0.000647141
$P_2$	-0.002163285	-0.00201175
$P_3$	0	0
$P_4$	0	0
$B_1$	0	-18.7104

Saadud kalibratsiooniparameetreid kasutati edasises töös Pythoni skriptis, mille abil arvutati 12 komplekti tulemusi erinevates kombinatsioonides (joonis 11)

### 3. Tulemused

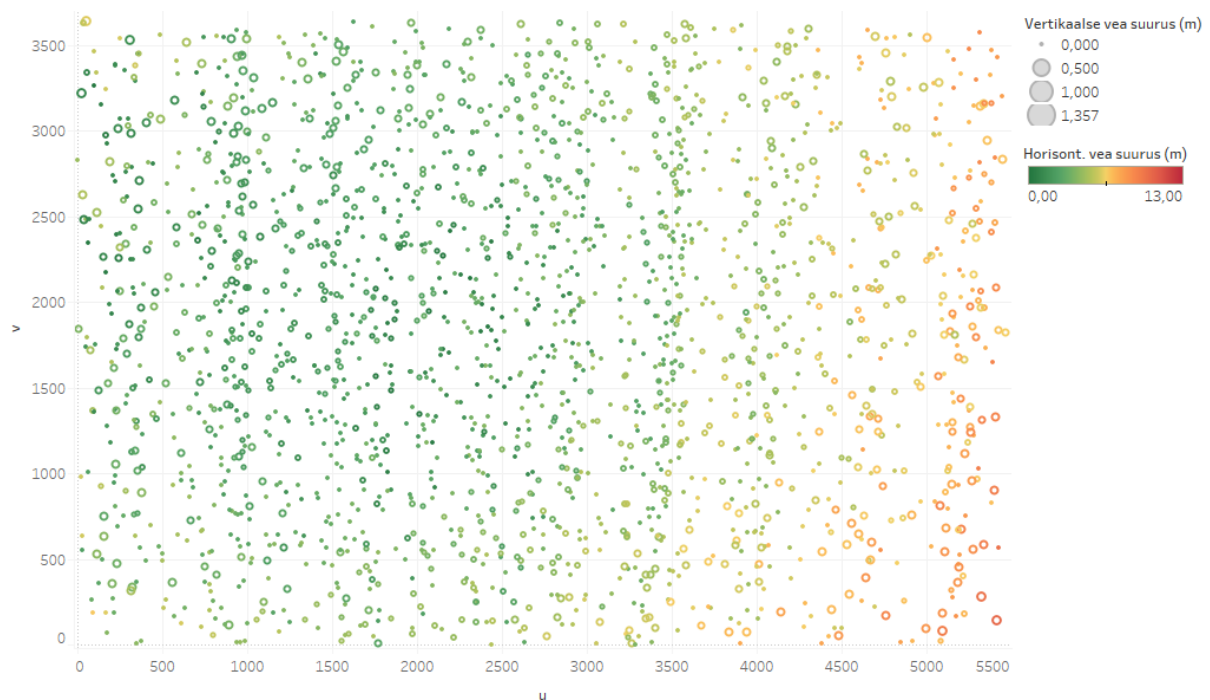
Läbiv anomaalia (vead suurusjärgus 100+ meetrit) esines kahel pildil asetsevate punktide puhul, mil punkt oli sattunud vahetult pildi serva peale, mistõttu ei suutnud skript luua korrektseid tulemusi. Need tulemused eemaldati käsitsi tulemustest ja neid arvesse ei võetud.

Tulemuste koondtabel asub peatüki lõpus (tabel 7).

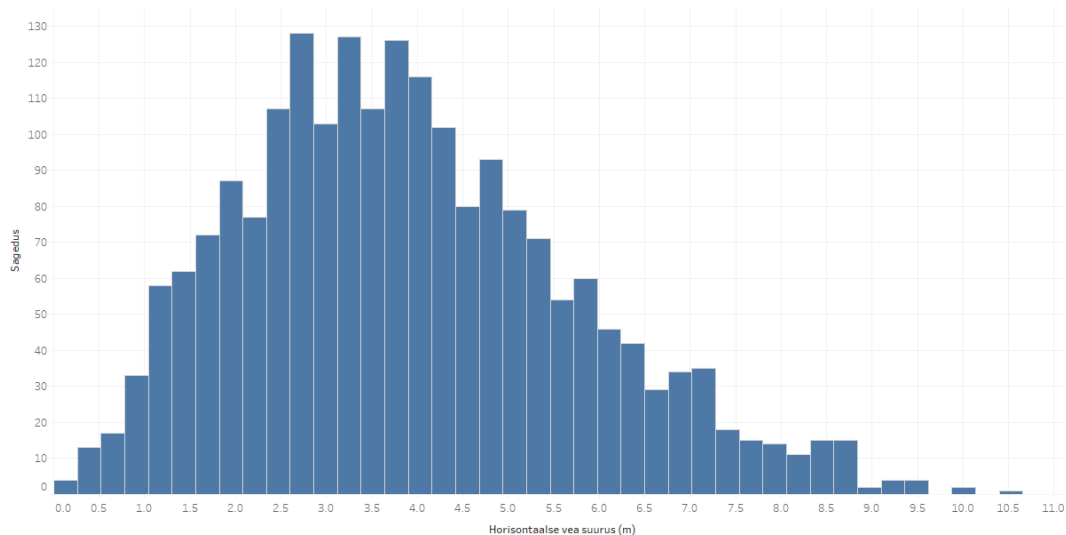
#### 3.1. Katse 1

Katse 1 tulemusel saadi teada laiatarbe UAV piltide otsese georefereerimise täpsus.

Katses selgus, et võimalik on saavutada vertikaalpildi puhul lennukõrgusel 80-100 meetrit maapinnast viga X koordinaadis keskmiselt 2.55 meetrit, Y koordinaadis 2.37 meetrit ja Z koordinaadis viga praktiliselt puudub (0.02 m). Kuna Z koordinaat meie töös nii oluline ei ole, siis sellele edaspidi suurt rõhku ei asetata. Keskmise horisontaalne viga on 3.90m, horisontaalse vea standardhälve on 1.84m. Joonisel 19 on näha horisontaalsete vigade koondumised pildi paremas küljes.



Joonis 19. Test K1\_0\_0. Otsese georefereerimise täpsus. Joonisel kajastub vigade jaotumine pildidel. Teljed u ja v tähistavad foto pikemat ja lühemat koordinaattelge, ühik piksel.



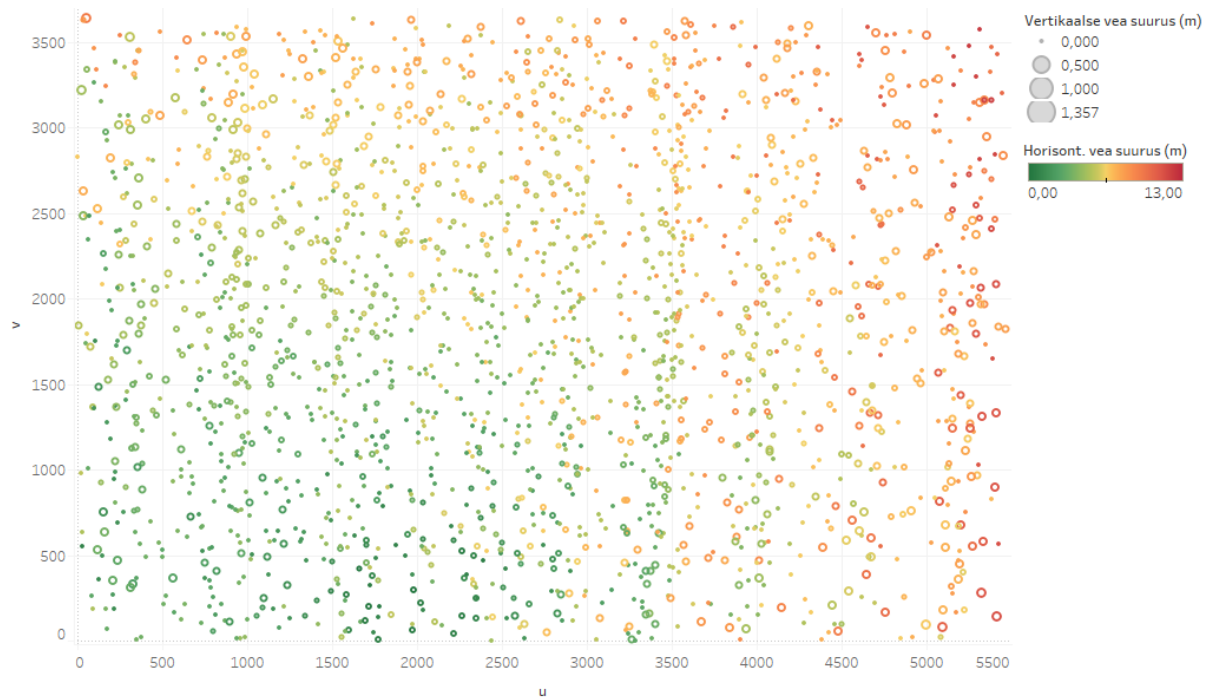
Joonis 20. Horizontaalsete vigade jaotumine.

### 3.2. Katse 2

Katses 2 selgitati välja objektiivi moonutuste arvestamise mõjud ruumilisele täpsusele laiatarbe UAV kasutamisel.

Katse käigus olid kasutusel nii laboratoorsetes tingimustes kui välitöö käigus saadud kaamera geomeetrilise moonutuse parameetrid, mille kasutamiseks oli skripti integreeritud Brown-Conrady mudel (joonis 9).

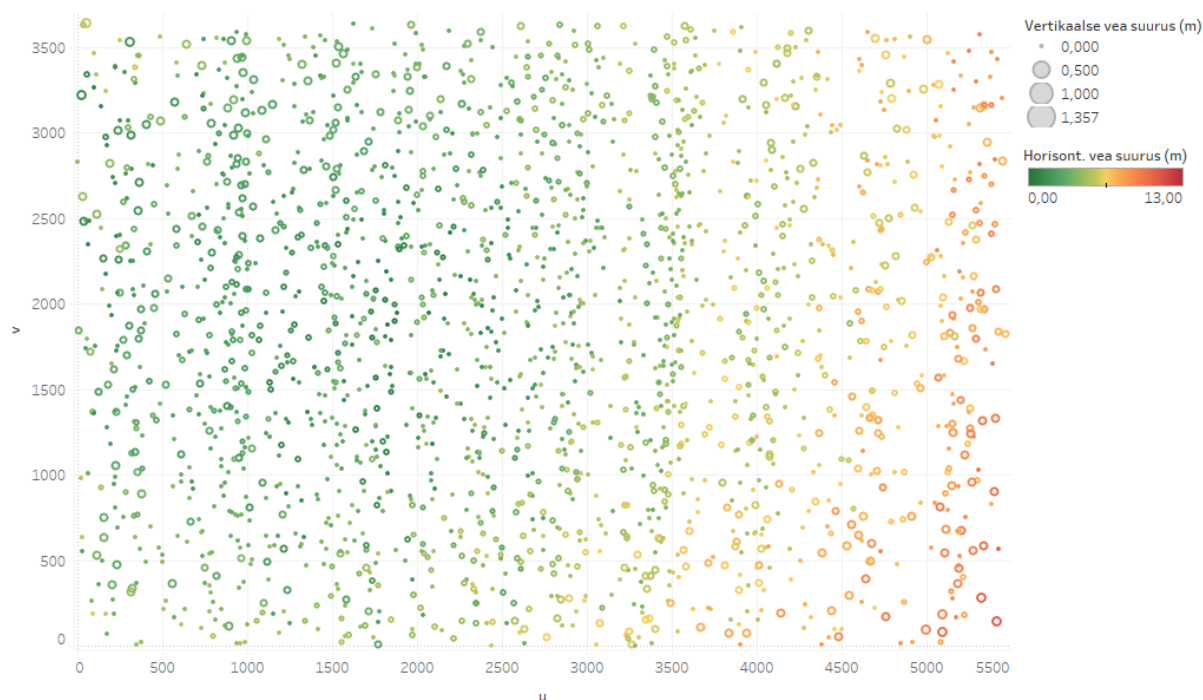
Laboratoorselt saadud geomeetrilise moonutuse parameetrite kasutamise puhul oli keskmine viga X koordinaadil 3.47 meetrit, Y koordinaadil 3.94 meetrit ja Z koordinaadil 0.02m. Keskmine horisontaalne viga on 5.66m, horisontaalse vea standardhälve on 2.23m. Joonisel 21 on näha, et suurema ruutkeskmise veaga punktid on koondunud piltidel lisaks paremale servale ka ülemisse serva.



Joonis 21. Test K2\_L\_0.

Välitöö andmetest saadud geomeetrilise moonutuse parameetrite kasutamisel oli keskmine viga X koordinaadil 2.78m, Y koordinaadil 2.50m ja Z koordinaadil 0.02 meetrit. Keskmine horisontaalne viga oli 4.22m, standardhälve 1.95m.

Joonisel 22 on näha, et kasutades välitöö käigus saadud objektiivi kalibreerimisparameetreid, ei ole vigade jaotumine oluliselt erinev kalibreerimisparameetrite mittearvestamisel tehtud pildist.



Joonis 22. Test K2\_V\_0.

### 3.3. Katse 3

Katses 3 võeti kasutusele Agisoft Metashape poolt loodud SfM mudel, millest võeti parandatud kaamera asukohad, mille abil katsetati nende mõju otsese georefereerimise tulemustele.

Kasutades SfM mudeli põhjal Agisoft Metashape abil arvutatud parandatud kaamera asukohti ja pildistamisnurki, olid tulemused järgnevad.

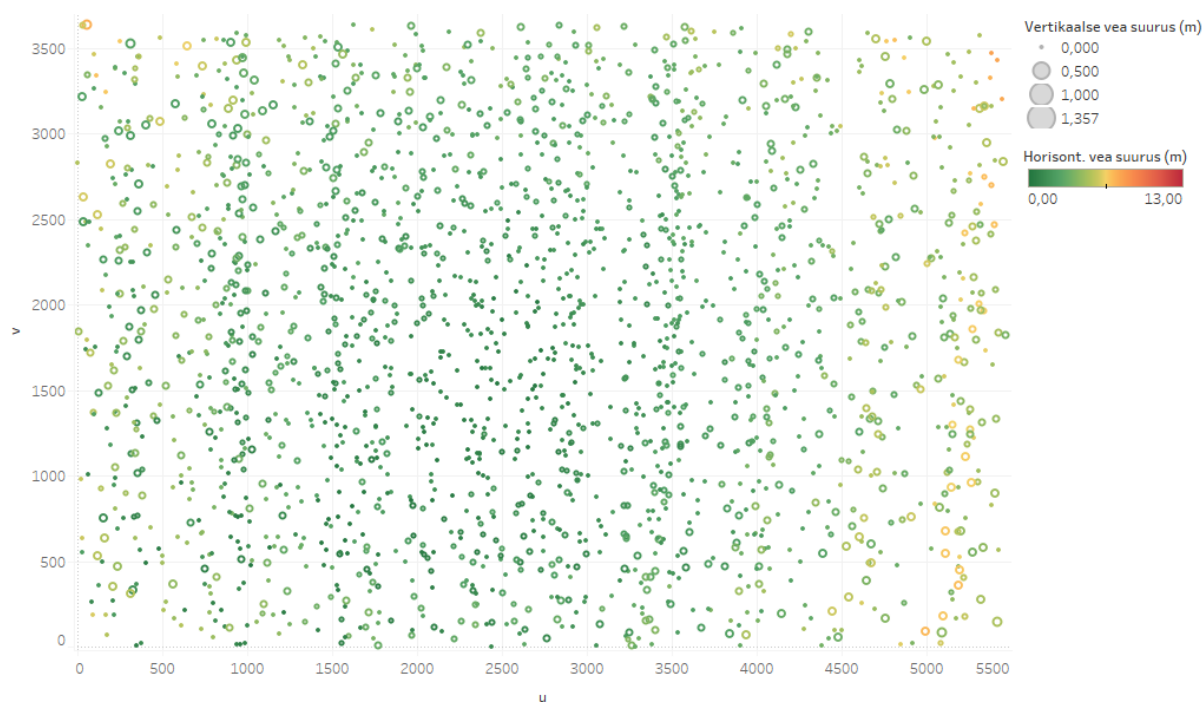
#### 3.3.1. Parandatud kaamera asukohad

Tabelist 4 ja joonistest 23 ja 24 selgub, et nii geomeetriliste moonutuste mitteamvestamisel kui ainult välitöö andmetest saadud geomeetrilise moonutuse parameetreid arvesse võttes on tulemused tunduvalt paremad kui kasutades laboratoorselt saadud kalibreerimisparameetreid. Seejuures annab parima tulemuse kalibreerimisparameetrite mitteamvestamine. Keskmine viga on kalibreerimisparameetrite mitteamvestamise korral ja välitöö parameetreid kasutades väiksema väärtusega, kui katsetes 1 ja 2, paranedes eelkõige X ja Y telgede vigade puhul. Näha on ka vigade ühtlasem jaotus.

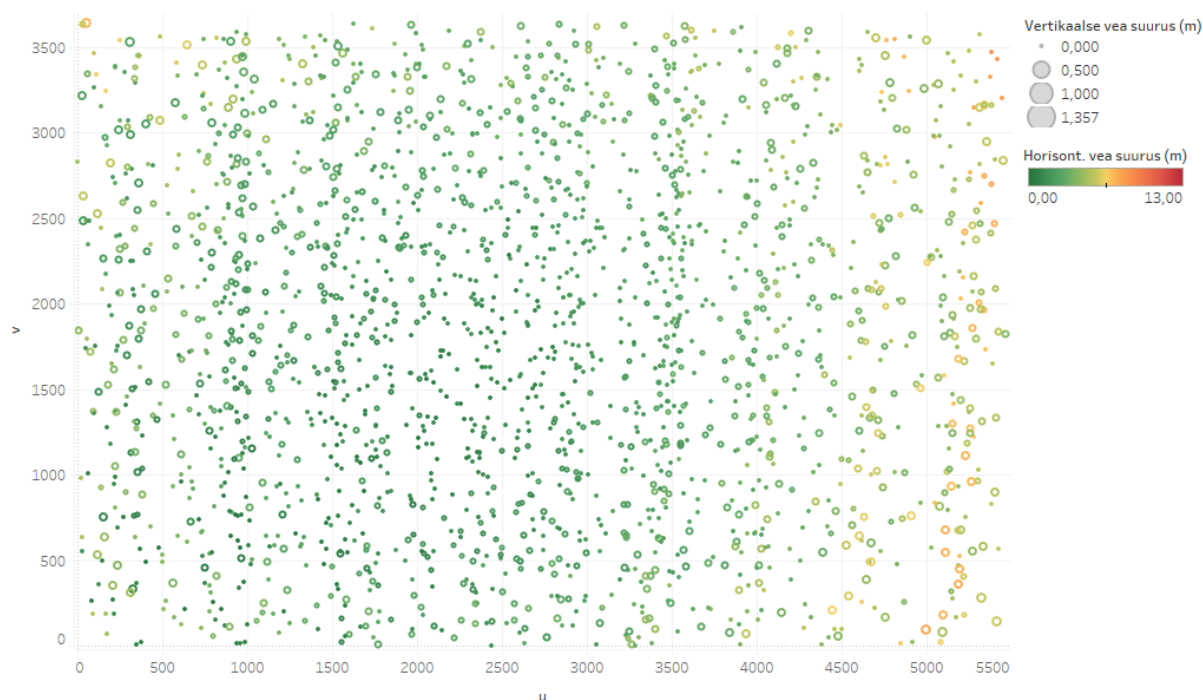
Laboratoorse kalibreerimise puhul tulemused ei paranenud ja antud juhul on tulemused sel puhul tunduvalt halvemad.

Tabel 4. Tulemused kasutades SfM abil saadud parandatud kaamera asukohti (tulbad X, Y, Z – vastavate koordinaattelgede keskmine viga meetrites,  $\sigma$  – standardhälve ).

Kalibreerimisparameeter	X	Y	Z	Keskmine horisontaalne viga	Horisontaalse vea $\sigma$
Kalibreerimata (K3_0_A)	1.71	1.71	0.02	2.70	1.44
Laboratoorne (K3_L_A)	2.98	3.70	0.02	5.25	1.67
Välitöö (K3_V_A)	1.82	1.75	0.02	2.82	1.49



Joonis 23. Test K3\_0\_A.



Joonis 24. Test K3\_V\_A.

### 3.3.2. Parandatud kaameranurgad

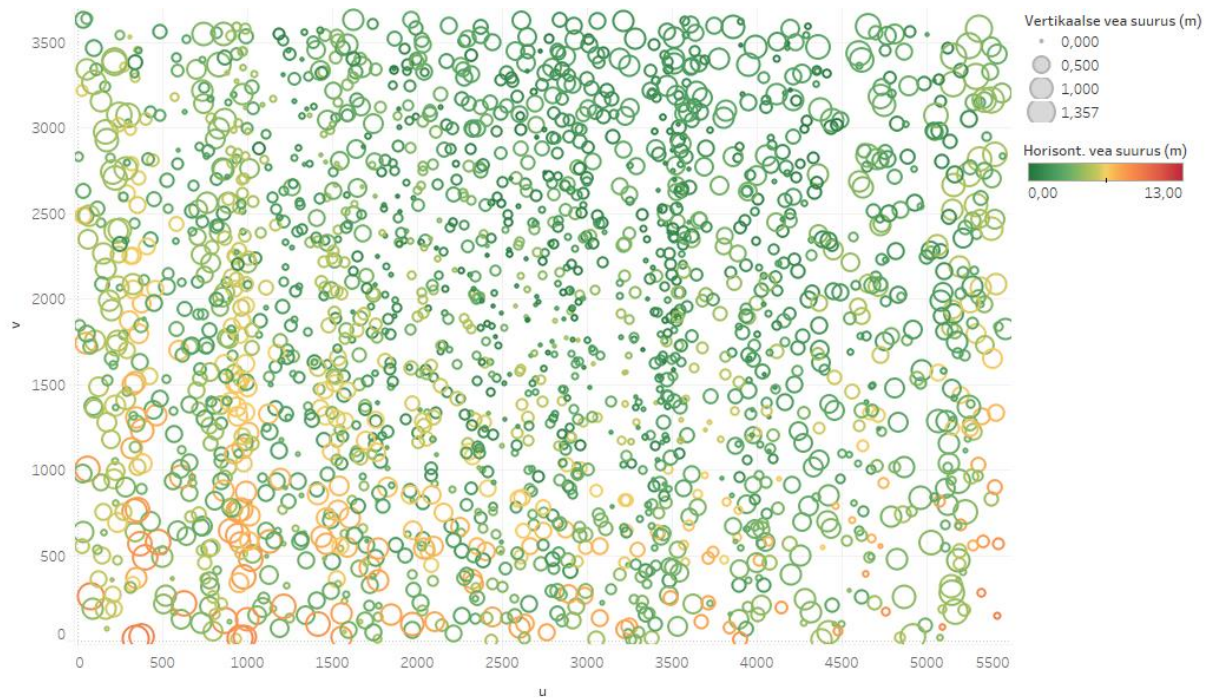
Kasutades arvutustes SfM mudeli põhjal saadud parandatud kaamera nurki, on näha läbivad jooned, kus Z telje vead on väikesed, kuid ülejäänud pildi osas tunduvalt suuremad. See kajastub ka kõigi kolme erinevate parameetritega tehtud arvutuse puhul püsivas Z telje vea suuremas väärtuses. Ka käesoleval juhul on laboratoorse kalibreerimisparameetri puhul vead suuremad kui ülejäänud kahel juhul (tabel 5, joonised 25, 26).

Laboratoorsete kalibreerimisparameetrite näitajad on aga parandatud kaameranurkade puhul paremad kui olid samal juhul parandatud kaameraasukohtade puhul, kuid üldiselt olid tulemused kalibreerimisparameetrite mitteamvestamise ja välitöö parameetrite puhul halvemad kui parandatud kaameraasukohtade puhul.

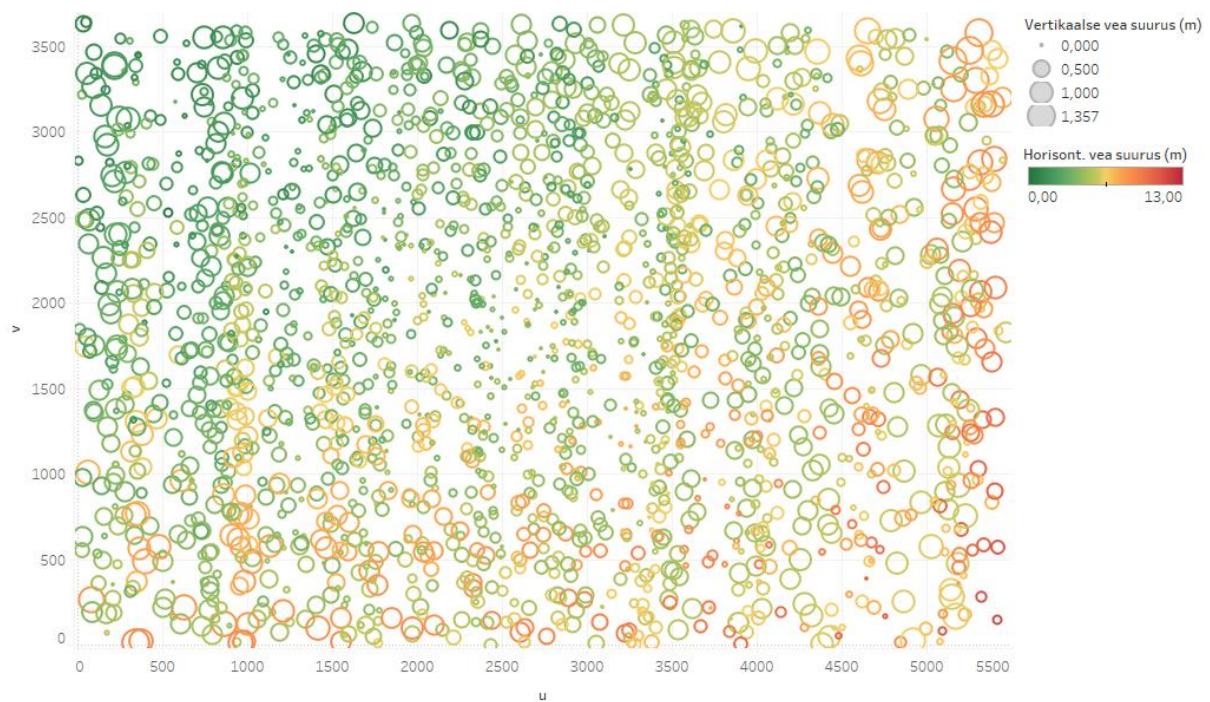
Tabel 5. Tulemused kasutades SfM abil saadud kaamera nurki.

Kalibreerimisparameeter	X	Y	Z	Keskmine horisontaalne viga	Horisontaalse vea $\sigma$
Kalibreerimata (K3_0_N)	2.46	1.87	0.29	3.37	1.87
Laboratoorne (K3_L_N)	3.16	3.11	0.29	4.93	1.91
Välitöö (K3_V_N)	2.74	2.06	0.29	3.76	2.02





Joonis 25. Test K3\_0\_N.



Joonis 26. Test K3\_L\_N.

### 3.3.3. Parandatud kaamera asukohad ja nurgad

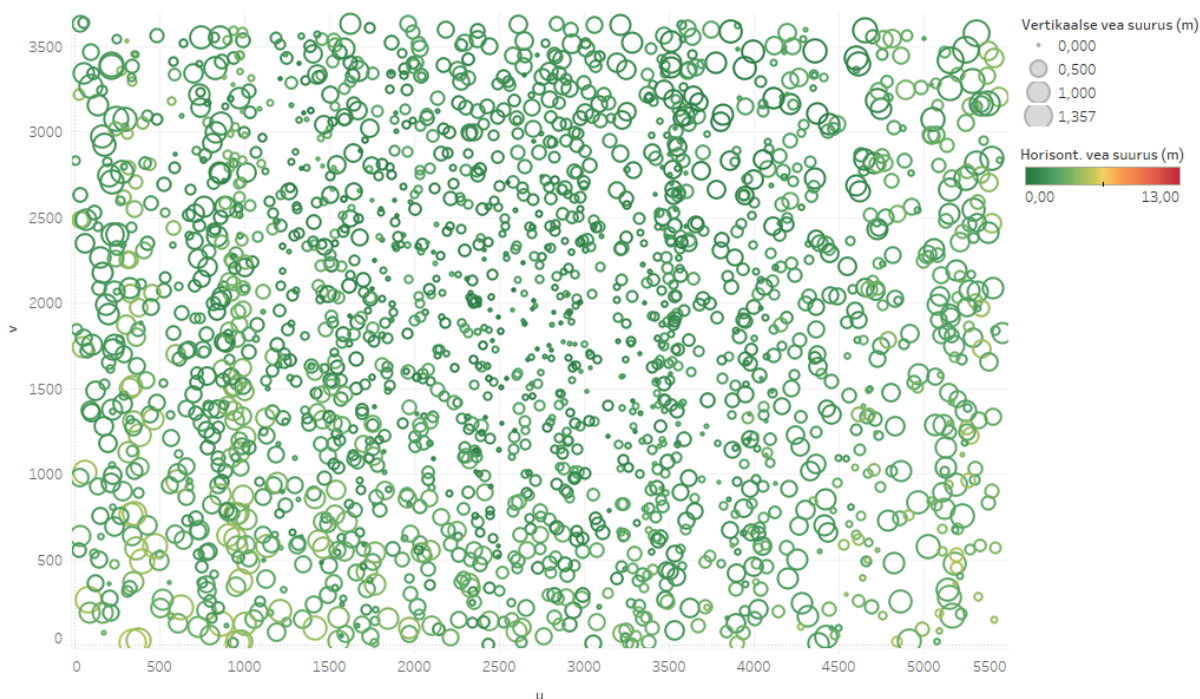
Võttes arvesse SfM mudeli abil parandatud kaameranurki ja asukohti, olid horisontaalsete koordinaatide veahinnangud parimad kõigi kalibreerimisparameetrite puhul. Ka antud juhul on laboratoorsete kalibreerimisparameetrite puhul tulemused tunduvalt halvemad kui välitöö

parameetreid ja kalibreerimisparameetrite mitteamvestamist kasutades (tabel 6, joonised 27, 28, 29)

Ka antud juhul esineb läbivalt „kiiri“ kus Z telje viga on väiksem, kuid X ja Y telje ruutkeskmiste vigade jaotus on kahtluseta kõige ühtlasem.

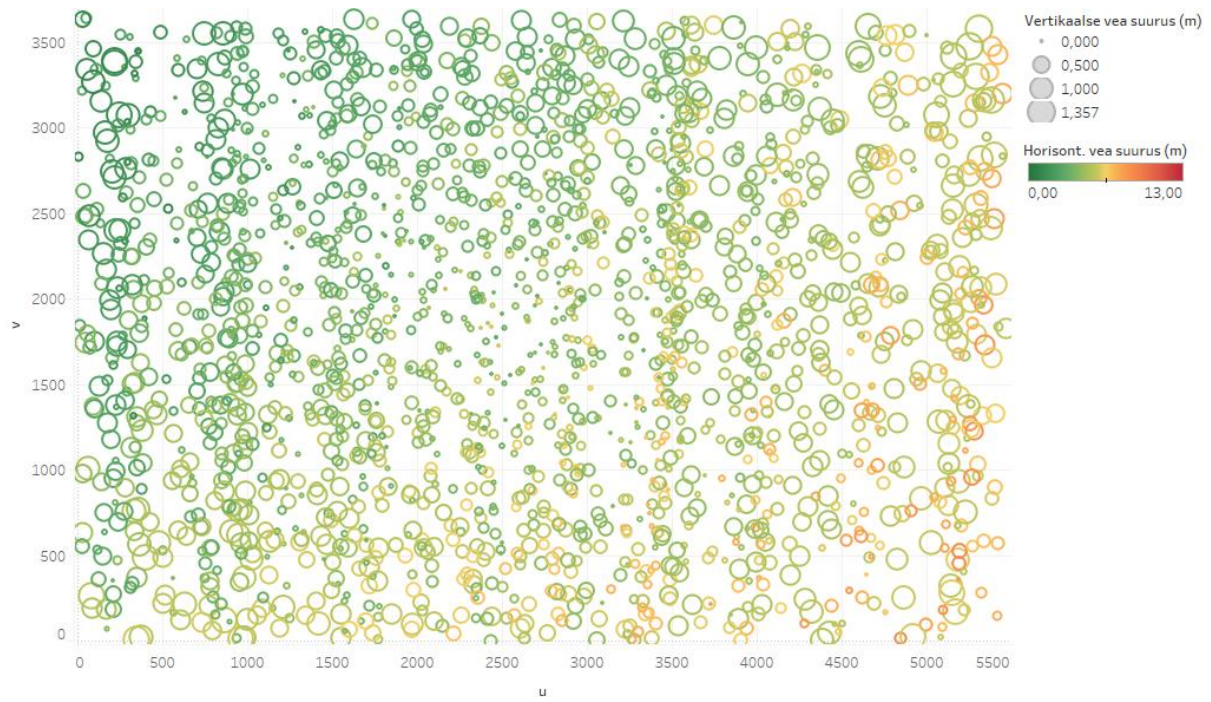
Tabel 6. Tulemused kasutades SfM abil saadud parandatud asukohti ja nurki.

Kalibreerimisparameeter	X	Y	Z	Keskmine horisontaalne viga	Horisontaalse viga $\sigma$
Kalibreerimata (K3_0_AN)	1.29	1.21	0.28	1.96	1.02
Laboratoorne (K3_L_AN)	2.57	2.92	0.28	4.48	1.41
Välitöö (K3_V_AN)	1.52	1.25	0.28	2.16	1.14

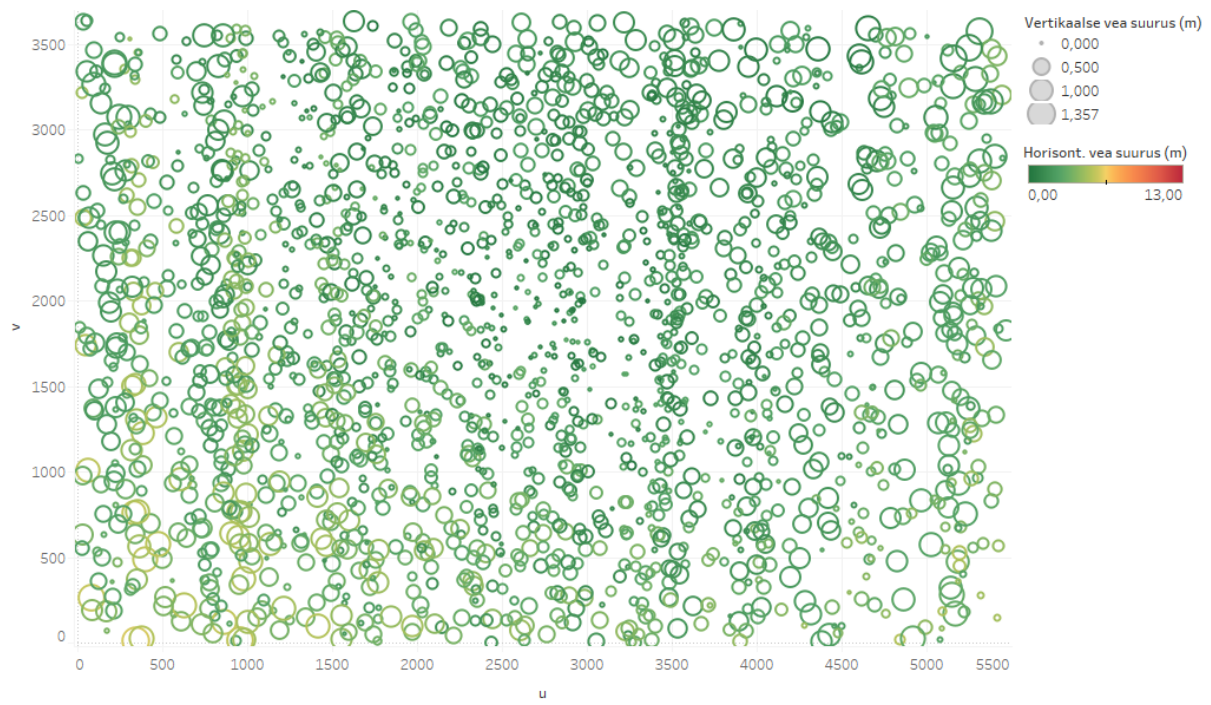


Joonis 27. Test K3\_0\_AN





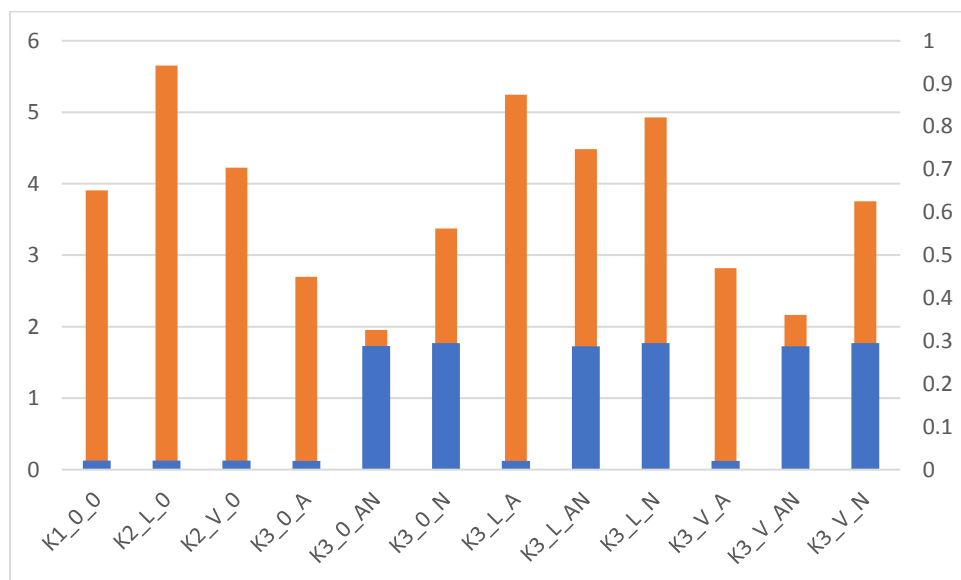
Joonis 28. Test K3\_L\_AN.



Joonis 29 Katse K3\_V\_AN

Tabel 7. Koondtabel tulemustega.

Testi kood	X	Y	Z	Keskmine horisontaalne viga	Horisontaalse vea $\sigma$
K1_0_0	2.55	2.37	0.02	3.90	1.84
K2_L_0	3.47	3.94	0.02	5.66	2.23
K2_V_0	2.78	2.51	0.02	4.22	1.95
K3_0_A	1.71	1.71	0.02	2.70	1.44
K3_L_A	2.98	3.70	0.02	5.25	1.67
K3_V_A	1.82	1.75	0.02	2.82	1.49
K3_0_N	2.47	1.89	0.30	3.37	1.87
K3_L_N	3.17	3.12	0.30	4.93	1.91
K3_V_N	2.75	2.06	0.30	3.76	2.02
K3_0_AN	1.30	1.21	0.28	1.96	1.02
K3_L_AN	2.57	2.93	0.29	4.48	1.41
K3_V_AN	1.52	1.25	0.29	2.16	1.14



Joonis 30. Keskmine horisontaalne viga (oranž) ja keskmine vertikaalne viga (sinine) testi kaupa.

## 4. Arutelu

Kalibreeritud kaamera parameetrite kasutamine otsese georefereerimise valemis andis mõnevõrra üllatavad tulemused, kuna tulemused paranesid kas vähe või muutus täpsus halvemaks.

Tulemuste halvenemine oli iseloomulik laboratoorsetes tingimustes kalibreeritud kaamera parameetrite kasutamisel. Selle põhjuseks võib olla asjaolu, et kalibreerimine toimub väikeselt distantilt, võrreldes droonilennu piltidega. Väikese distantsi puhul peab kaamera teravustama suhteliselt lähedale, mis muudab pildi geomeetrilisi omadusi, sest objektiivis muutub läätsede omavaheline paiknemine. Samuti võib olla põhjuseks asjaolu, et kalibreerimispilt sisaldab projektori optikast tulenevaid moonutusi, mis arvutatakse kalibreerimisparameetrite sisse. Hilisematel droonilennupiltidel need moonutused aga puuduvad.

Kui kaamera on kalibreeritud aeropiltide ja maa peal märgitud punktide abil, on tulemused mõnevõrra paremad, kuid jäävad täpsuselt kõigis parameetrites alla kalibratsiooni mittearvestamisel saadud tulemustele.

SfM töövoogi integreerimisel tulemuse parandamisse oli kõige märkimisväärsim mõju siis, kui kasutati nii kaamera parandatud asukohti kui nurki. Oluliselt parandas tulemusi ka ainult parandatud kaamera asukohtade kasutamine, kuid ainult parandatud nurkade kasutamine märkimisväärselt mõju tulemustele ei avaldanud. See omakorda näitab, et droonipiltide vead on eelkõige asukohtade, mitte niivõrd nurkade täpsuses.

Kõikidel juhtudel kui võeti kasutusele parandatud nurgad, suurenes olulisel määral vertikaalne viga. Joonistel 25-29 selgub, et viga esines eelkõige pildi servades, ehk tõenäoliselt jääb parandatud nurkade kasutamisel jääb korrigeeritud droonipilt maapinna suhtes nurga alla.

See näitab, et droonipiltide vead on eelkõige asukoha, mitte nurkade täpsuses.

Laiatarbedroonilt otsese georefereerimise meetodit kasutades on võimalik saada tulemusi, mis on piisava täpsusega teatud tegevusalade puhul (päästetööd, nähtuste seiramine). Kui kasutusel on suhteliselt väikeste moonutustega kaamerad, nagu antud töös kasutusel olnud DJI Mavic 2 Pro originaalkaamera, ei mõjuta kalibreerimisparameetrite lisamine valemitesse täpsust siledal maapinnal oluliselt.

Horisontaalse täpsuse parandamisel on võimalik parandada tulemusi mõne meetri võrra juhul, kui kasutatakse SfM algoritmiga loodud mudelit ja parandatud kaamera asukohti ja nurki. SfM mudeli kasutamine tuleb kõne alla juhul, kui tegemist ei ole kiiret reageerimist nõudvate sündmuste lahendamisega, kuna SfM töövoos loomine võib olenevalt piltide hulgast olla ajakulukas.

SfM algoritmi järgi saadavad drooni horisontaalsete asukohakoordinaatide parandid näitavad ka, et tõenäoliselt oleksid tulemused paremad, kui kasutusel oleks RTK-GNSS tehnoloogia kasutamist võimaldav droon. Selle katsetamine oleks käesoleva töö koostaja arvates huvitav, ning tänu droonitehnoloogia pidevale arengule on RTK võimalusega droonid ilmselt juba lähiajal tavakasutajale mõistliku hinnaga kättesaadavad.

Nagu näha tulemuste joonistelt, on siiski ilmne, et ka koos gimbaliga ei ole võimalik hoida kaamerat perfektselt vertikaalselt, millest tulenevalt suurenevad vead kaldteljest kaugenedes. Selliste vigade väärtused ei mõjuta küll oluliselt mõõdistustulemusi, kuid on tähtsaks informatsiooniallikaks juhul, kui arendatakse täpsemaid arvutussüsteeme.

Erinevate UAV-de kasutamise puhul on äärmiselt oluline teha kindlaks väljundandmete formaat. Mitmete droonide ja gimbalite puhul võib esineda erisusi nurkade määramise meetodis, näiteks kas nurki hakatakse arvestama vertikaal- või horisontaalteljest, kas skaala on 0-360 kraadi või -180 kuni 180 kraadi jne. Sellest tulenevalt on hooletu arvutamise tulemuseks vigased andmed. Sellest tulenevalt on vajalik, et drooni väljundandmed ja skriptide sisendandmed viiakse samale kujule kas automaatselt täiendava skripti abil või manuaalselt. Täiendava skripti loomine drooniandmete vahepealseks töötlemiseks teeb võimalikuks kiire andmetöötlusvoo loomise, mida on võimalik kasutada ka kiiret reageerimist nõudvate sündmuste puhul.

Katse 1 oli kõikide katsete kontekstis kõige lihtsam. Kuna toorandmete töötlemist (geomeetriliste moonutuste korrigeerimine jne) ei esinenud, on seda võimalik kasutada otse ja sisuliselt ilma modifitseerimata. Siiski tuleb kindlaks teha toorandmetes sisalduvate nurkade arvestamise eripärad ja vastavalt sellele viia vajadusel sisse parandused koodis.

Katses 2 oli lisatud optika geomeetrilise moonutuse parameetrid, mis sisuliselt töötamise aega ei muuda. Küll aga nõuab kaamera kalibreerimine geomeetriliste moonutuste saamiseks eraldi tööd, mis on pidevalt sarnaste kõrguste kasutamise puhul ühekordne. Katse tulemusena aga selgus, et kasutusel olnud kaamera (DJI Mavic 2 Pro) puhul oli kalibreerimise mõju täpsusele

suhteliselt väike. See võib tuleneda asjaolust, et antud kaamera geomeetrilised moonutused on juba algselt üsna väikesed.

Antud katses oli ka näha, et kalibreerimisparameetrid võivad täpsust vähendada. Antud töös esines selline olukord just laboratoorse kalibreerimise puhul, mis võib tuleneda asjaolust, et pildid olid tehtud suhteliselt lähedalt, mistõttu kaamera teravustamine antud kaugusele muudab juba kaamera geomeetriat, ning sellest tulenevalt tekitab täpsuse kahanemise.

Katses 3 paranesid tulemused kõige rohkem juhul, kui kasutati nii SfM mudeli abil parandatud nurki kui kaamera asukohti. Samas on SfM mudeli loomine ja parandatud andmete saamine kõige aja- ja ressursimahukam, millest tulenevalt ei sobi antud meetod kiiret reageerimist nõudvate ülesannete lahendamiseks.

Samuti on parandatud nurkade lisamisel tuvastatav oluline muutus  $Z$  koordinaadi täpsuses, millest tulenevalt võib arvata, et droonilt saadavad andmed pildi kalde osas ei vasta tegelikkusele ja arvutuses tekib antud koordinaadis viga. Kuna aga viga reaalses tingimustes ei ole märkimisväärne ja antud töös kontekstis on huvipakkuvad pigem plaaniline asukoht, ei ole  $Z$  koordinaadi täpsuse kahanemine niivõrd oluline, kuna horisontaalsed vead ei suurenenud.

Kuna parandatud kaameranurkade kasutamine arvutustes mõjutab  $Z$  telje koordinaadi täpsust tunduvalt, võib olla vajalik kontrollida gimballi tööd ja väljastatavaid andmeid täiendavalt.

Katsete 1 ja 3 tulemuste põhjal võib järeldada, et Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni kasutamine ilma täiendavate paranditeta tagab piisava täpsuse kasutamiseks näiteks päästevaldkonnas, objektide asukoha määramisel õhust, maastikuluurel, objekti asukoha määramisel raskesti ligipääsetavas keskkonnas jne, kus nõuded täpsusele jäävad mõne meetri sisse.

Edasistes uuringutes on võimalik rakendada ka valemeid kaldpildil objekti asukoha tuvastamiseks, mis laiendab antud funktsioonide rakendamise võimalusi veelgi.

## Kokkuvõte

Antud töös käsitletakse Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni kasutamist vertikaalsete droonifotode otsesel georefereerimisel. Antud töös testiti valemit kolmel erinevalt viisil. Katses 1 selgitati välja otsese georefereerimise täpsus toorandmete põhjal, katses 2 uuriti objektiivi geomeetriliste moonutuste kõrvaldamisel saadavat tulemuste muutust ning katses 3 selgitati SfM mudeli kasutamisel saadavate parandatud nurkade ja kaamera asukohtade mõju katsetulemustele.

Katses 1 selgus Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni kasutamisel saadav keskmine täpsus XY telgedel, milleks oli 2.46 meetrit ja vertikaalne viga sisuliselt puudus.

Katses 2 selgus, et kaamera geomeetriliste moonutuste parandamine antud kaamera kasutamise korral tulemusi ei paranda. Antud asjaolu võib tuleneda ka ebaõnnestunud kalibreerimisest.

Katses 3 selgus, et SfM mudelist saadud parandatud kaamera nurgad ja asukohad parandavad horisontaalseid tulemusi oluliselt, kuid viga vertikaalteljel muutub suuremaks, saavutades kõige paremal juhul XY telgede vea keskmise väärtuse 1.25m.

Antud töö kokkuvõtteks võib järeldada, et Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni kasutamine vertikaalsetel droonifotodel ilma täiendavate paranditeta tagab piisava täpsuse päästevaldkonnas rakendamiseks, samuti objektide asukoha tuvastamiseks jne. Täiendavalt võib kasutada ka SfM mudelist saadavaid parandatud kaamera nurki ja asukohti, kuid seda on võimalik teha eeldusel, et tegu ei ole kiiret reageerimist nõudva sündmusega.



## Summary

### **Direct Georeferencing of UAV Imagery using Helmert Three-Dimensional Transformation.**

The aim of this paper was to test direct georeferencing using Helmert's three-dimensional transformation on vertical drone photos. The algorithm was tested in three ways.

In test 1, the accuracy of sole Helmert algorithm with raw data was tested, in test 2, the impact of adding lens distortion corrections were tested and in test 3 the use of corrected camera angles and positions from SfM-algorithm were tested.

The results of test 1 showed that the accuracy of using Helmert's three dimensional transformation will average to 2.46 metres on XY axis, while on the vertical (Z axis) the error was basically non-existent.

The results of test 2 showed that the correction of camera lens distortion had little to no effect to the results, or even made them worse.

The results of test 3 showed that the corrected camera angles and positions from SfM algorithm will improve the results on XY axis significantly, but the accuracy on Z axis will decline. The average error on XY axis was 1.25m at the best case.

In conclusion we can say that the use of Helmert's three-dimensional transformation on vertical drone photos without any other corrections will provide sufficient accuracy to use in SAR, the identification of object location and other time dependent applications. To improve the results, the use of corrected camera angles and positions is possible, but will result in longer processing time.

## Kasutatud allikad

Agisoft LCC 2017. Agisoft Lens user manual: version 1.3.2.

Brown, D. 1966. Decentering distortion of lenses. – Photogrammetric engineering, , lk 444–462.

Brown, D. 1971. Close-range camera calibration. – Photogrammetric engineering, , lk 855–866.

Burdziakowski, P. 2017. Low cost hexacopter autonomous platform for testing and developing photogrammetry technologies and intelligent navigation systems. Vilnius, Leedu.

Cramer, M; Stallmann, D; Haala, N. 2000. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, kd 33., lk 198–205.

DJI. Mavic 2 - Specifications, FAQs, Videos, Tutorials, Manuals - DJI. – DJI Official. Veebiaadress: <https://www.dji.com/ee/mavic-2/info>. [Vaadatud: 02.04.2019]

Eisenbeiss, H. 2009. UAV Photogrammetry. Zürich, Šveits: ETH Zürich.

Eisenbeiss, H; Sauerbier, M. 2011. Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. – The Photogrammetric Record, kd 26, nr 136, lk 400–421.

Evogimbals 2017. How does a 3 axis GoPro or DSLR gimbal work? – Evogimbals. Veebiaadress: <https://www.evogimbals.com/blogs/evo-blog/how-does-a-3-axis-gopro-or-dslr-gimbal-work>. [Vaadatud: 15.04.2019]

Gabrlik, P. 2015. The Use of Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetry with Micro UAV. – IFAC PapersOnLine, kd 48–4, lk 380–385.

Gerke, M; Przybilla, H. 2016. Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. Veebiaadress: [https://www.researchgate.net/publication/299369565\\_Accuracy\\_Analysis\\_of\\_Photogrammetric\\_UAV\\_Image\\_Blocks\\_Influence\\_of\\_Onboard\\_RTK-GNSS\\_and\\_Cross\\_Flight\\_Patterns](https://www.researchgate.net/publication/299369565_Accuracy_Analysis_of_Photogrammetric_UAV_Image_Blocks_Influence_of_Onboard_RTK-GNSS_and_Cross_Flight_Patterns).

Guilmartin, J. Unmanned aerial vehicle. – Encyclopedia Britannica.

IPTC 2019. What is Photo Metadata - IPTC. – International Press Telecommunications Council. Veebiaadress: <https://iptc.org/standards/photo-metadata/photo-metadata/>. [Vaadatud: 08.05.2019]

Lennuamet, Tarbijakaitseamet, Tehnilise Järelevalve Amet, Andmekaitse Inspektsioon 2018. Käitaja meelespea: Mehitamata õhusõiduki (s.h. drooni) käitamine. Veebiaadress: [https://www.ecaa.ee/sites/default/files/content-editors/ops/droonid/meelespea\\_kaitajale.pdf](https://www.ecaa.ee/sites/default/files/content-editors/ops/droonid/meelespea_kaitajale.pdf). [Vaadatud: 22.03.2019]

Luhmann, T; Robson, S; Kyle, S; Boehm, J. 2013. Close Range Photogrammetry and 3D Imaging. Göttingen, Saksamaa: De Gruyter.

Luhmann, T; Fraser, C; Maas, H. 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, kd 115, lk 37–46.

MathWorks. Model IMU, GPS and INS/GPS. – MathWorks. Veebiaadress: <https://nl.mathworks.com/help/fusion/gs/model-imu-gps-and-insgps.html>. [Vaadatud: 05.05.2019]

Mian, O; Hutton, J; Gavelle, E; Borghini, S. 2015. Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. – The International Archives of the Photogrammetry, kd 40,

Mundy, J; Hartley, R. 1993. Relationship between photogrammetry and computer vision. – Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision,

Pentjärv, A. 2016. Sokkia GSR 2700ISX vertikaalsed ja horisontaalsed mõõtmishälbed valitud maastikutingimustes. Tartu, Eesti: Tartu Ülikool.

Pollefeys, M; Koch, R; van Gool, L. 1999. – International Journal of Computer Vision, kd 32(1), lk 7–21.

Sinha, U. SIFT: Theory and Practice: Introduction - AI Shack. Veebiaadress: <http://aishack.in/tutorials/sift-scale-invariant-feature-transform-introduction/>. [Vaadatud: 16.03.2019]

Snavely, K. 2008. Scene reconstruction and visualization from internet photo collections. Washington, USA: University of Washington.

Szeliski, R. 2010. Computer Vision - Algorithms and applications. London, Suurbritannia: Springer.

Škaloud, J. 1999. Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS. Calgary, Kanada: University of Calgary.

Tartu Ülikool 2019. meteo.physic.ut.ee. – Ilmajaam Tartu Ülikooli füüsikahoone katusel. Veebiaadress: <http://meteo.physic.ut.ee/>. [Vaadatud: 25.03.2019]

Therry, M. 2018. What camera should you use for photogrammetry? – 80 Level. Veebiaadress: <https://80.lv/articles/what-camera-should-you-use-for-photogrammetry/>. [Vaadatud: 12.01.2019]

Tiimus, K; Tamre, M. 2010. Camera gimbal control system for unmanned platforms. Pärnu, Eesti.

TopCon 2014. HiPer V. – Topcon Positioning Systems, Inc. Veebiaadress: <https://www.topconpositioning.com/gnss/integrated-gnss-receivers/hiper-v>. [Vaadatud: 02.04.2019]

Valentak, Z. 2017. Drone market share analysis & predictions for 2018 - DJI dominates, Parrot and Yuneec slowly catching up. – DronesGlobe. Veebiaadress: <http://www.dronesglobe.com/news/drone-market-share-analysis-predictions-2018/>. [Vaadatud: 20.03.2019]

Westoby, M; Brasington, J; Glasser, N; Hambrey, M; Reynolds, J. 2012. „Structure-from-Motion“ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. – *Geomorphology*, kd 179, lk 300–314.

# Lisad

## Lisa 1

### Töös kasutatud skript

```
import numpy as np
import pandas as pd
import os, glob
from matplotlib import pyplot as plt
get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'inline')

os.chdir(r"C:\Users\Andris\Documents\makat88")
kaamerad = pd.read_csv("Kaamerad_kalibreeritud.csv", sep=';')
display(kaamerad)
# millisest reast võtta kaamera parameetrid
rida = 3

nimi = kaamerad.loc[rida][0]
sdim_x_mm = kaamerad.loc[rida][1]
sdim_y_mm = kaamerad.loc[rida][2]
sdim_x_px = kaamerad.loc[rida][3]
sdim_y_px = kaamerad.loc[rida][4]
px_x_dim_mm = sdim_x_mm / sdim_x_px
px_y_dim_mm = sdim_y_mm / sdim_y_px
f_mm = kaamerad.loc[rida][5]
fx = kaamerad.loc[rida][6]
fy = kaamerad.loc[rida][7]
cx = kaamerad.loc[rida][8]
cy = kaamerad.loc[rida][9]
skew = kaamerad.loc[rida][10]
k1 = kaamerad.loc[rida][11]
k2 = kaamerad.loc[rida][12]
k3 = kaamerad.loc[rida][13]
k4 = kaamerad.loc[rida][14]
p1 = kaamerad.loc[rida][15]
p2 = kaamerad.loc[rida][16]
p3 = kaamerad.loc[rida][17]
p4 = kaamerad.loc[rida][18]
b1 = kaamerad.loc[rida][19]

os.chdir(r"C:\Users\Andris\Documents\Makat88\PARANDATUD\ainulnurgad")
df_points = pd.read_csv("andmed_skripti.csv", sep=';')

def loe_muutujad(rida):
    # pixel values of point
    u = rida[10]
    v = rida[11]
    o = rida[9]
    p = rida[8]
    k = 360-rida[7]
    #if rida[7]>180:
    #    k = 360-rida[7]
    #else:
    #    k = rida[7]

    # Camera location: x and y coordinates are replaced
    Y0 = rida[5]
    X0 = rida[4]
    Z0 = rida[6]
    cam = np.array(((X0, Y0, Z0)))

    # location of points true coordinates
    Ytrue = rida[13]
    Xtrue = rida[12]
    Ztrue = rida[14]

    # Calculate scale: Flying height / focal length converted to meters
    m = (rida[6] - rida[14]) / (f_mm / 1000) # töötab väga hästi 2.40ga
    #m = 2570 # kõrgus 87,59 lendab kõrgusel 149 - punkti kohal: u 62m, f=0.024m
```

```

    return u, v, o, p, k, m, X0, Y0, Z0, cam, Xtrue, Ytrue, Ztrue

# ## Funktsioonid
def calc_rotation_matrix_opk(o, p, k):
    # convert degrees to radians
    o = np.deg2rad(o)
    p = np.deg2rad(p)
    k = np.deg2rad(k)
    r11 = np.cos(p)*np.cos(k)
    r12 = -np.cos(p)*np.sin(k)
    r13 = np.sin(p)
    r21 = np.cos(o)*np.sin(k) + np.sin(o)*np.sin(p)*np.cos(k)
    r22 = np.cos(o)*np.cos(k) - np.sin(o)*np.sin(p)*np.sin(k)
    r23 = -np.sin(o)*np.cos(p)
    r31 = np.sin(o)*np.sin(k) - np.cos(o)*np.sin(p)*np.cos(k)
    r32 = np.sin(o)*np.cos(k) + np.cos(o)*np.sin(p)*np.sin(k)
    r33 = np.cos(o)*np.cos(p)

    R = np.array(((r11, r12, r13), (r21, r22, r23), (r31, r32, r33)))
    return R

def px_to_imgcoord_cam(u, v):          #ilma kalibreerimisparameetriteta

    ximg = -sdim_x_mm/2 + px_x_dim_mm * u
    yimg = sdim_y_mm/2 - px_y_dim_mm * v
    print(" -- cam: image coordinates (mm): (%2.4f, %2.4f)" % (ximg, yimg))
    return ximg, yimg

def undistort_img_coord_calib_v2(u, v):    #kalibreerimisparameetritega
    X = (- cx + u)
    Y = (cy - v)
    x = X / fx
    y = Y / fy
    r = np.sqrt(np.power(x, 2) + np.power(y, 2))
    x_rad = x * (1 + k1*np.power(r,2) + k2*np.power(r,4) + k3*np.power(r,6) + k4*np.power(r,8))
    y_rad = y * (1 + k1*np.power(r,2) + k2*np.power(r,4) + k3*np.power(r,6) + k4*np.power(r,8))
    x_tan = (p1*(np.power(r,2) + 2*np.power(x,2)) + 2*p2*x*y)*(1 + p3*np.power(r,2) + p4*np.power(r,4))
    y_tan = (p2*(np.power(r,2) + 2*np.power(y,2)) + 2*p1*x*y)*(1 + p3*np.power(r,2) + p4*np.power(r,4))
    xp = x_rad + x_tan
    yp = y_rad + y_tan
    xudimg_px = xp * fx + xp*b1 + yp*skew
    yudimg_px = yp * fy
    xudimg_mm = (xudimg_px * px_x_dim_mm)
    yudimg_mm = (yudimg_px * px_y_dim_mm)
    return xudimg_mm, yudimg_mm

def calc_2_40(u,v,o,p,k,m,cam):

    ximg, yimg = undistort_img_coord_calib_v2(u, v) #kalib parameetritega
    #ximg, yimg = px_to_imgcoord_cam(u, v) #ilma kalib parameetriteta
    p_pilt = np.array(((ximg/1000, yimg/1000, -f_mm/1000)))
    R = calc_rotation_matrix_opk(o, p, k)
    dot2 = np.matmul(R, p_pilt)
    dot3 = m * dot2
    dot4 = cam + dot3
    dot5 = (dot4 - np.array(((Xtrue, Ytrue, Ztrue))))
    rms = np.sqrt(np.power(dot5[0],2) + np.power(dot5[1],2) + np.power(dot5[2],2))
    return dot4[0], dot4[1], dot4[2], ximg, yimg

%%capture

# teen tühjad listid
x241 = []
y241 = []
z241 = []
ximg1 = []
yimg1 = []

for i in range(len(df_points)):
    u, v, o, p, k, m, X0, Y0, Z0, cam, Xtrue, Ytrue, Ztrue = loe_muutujad(df_points.iloc[i])
    x24, y24, z24, ximg, yimg = calc_2_40(u,v,o,p,k,m,cam)

    x241.append(x24)

```

```

y24l.append(y24)
z24l.append(z24)
ximgl.append(ximg)
yimgl.append(yimg)

df = df_points.copy(deep=True)
df['x24'] = x24l
df['y24'] = y24l
df['z24'] = z24l
df['ximg'] = ximgl
df['yimg'] = yimgl
df['d_x24'] = df['x24'] - df['X_true']
df['d_y24'] = df['y24'] - df['Y_true']
df['d_z24'] = df['z24'] - df['Z_true']
df['rms24'] = np.sqrt(np.power(df['d_x24'], 2) + np.power(df['d_y24'], 2) + np.power(df['d_z24'], 2))

display(df.columns)
display(df.sample(5))
df.to_csv('failinimi.csv')

```

## Lisa 2

### Pildid välitöö protsessist



Punktide mahamärgimine markervärviga.



Punktide mõõdistamine GNSS seadmega.



Droonilennu algus. Operaator: MSc Edgar Sepp.



# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Andris Pentjärv,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Droonifotode otsene georefereerimine Helmerti kolmemõõtmelise transformatsiooni abil“

mille juhendajad on PhD Raivo Aunap ja MSc Edgar Sepp,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Andris Pentjärv*

**27.05.2019**